

FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONÓMICAS Y
GEOFÍSICAS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

TESIS DOCTORAL

Subpoblaciones de cúmulos globulares:
claves sobre la formación de galaxias de
tipo temprano en grupos y el campo

Lic. Carlos Gabriel Escudero

Tesis presentada para optar por el título de Doctor en Astronomía

3 de octubre de 2016

Director:

Dr. Favio R. Faifer

Co-Directora:

Dra. Lilia P. Bassino

Jurados:

Dra. Celeste Parisi (Universidad Nacional de Córdoba)

Dr. Sergio Cellone (FCAG–UNLP)

Dr. Gustavo Baume (FCAG–UNLP)

Agradecimientos

“... a hombros de gigantes.”

Esta Tesis no hubiera sido posible sin el apoyo de diversas personas que han pasado por mi vida. En particular quiero agradecer a mis padres Graciela y Jorge, mi hermano Paulo, mi abuela Vilma, mis tíos Eva, Ana e Ismael, y a quienes han partido pero que aún se encuentran a mi lado. Ellos siempre han estado presentes dándome ánimo y confianza siendo mis guías en la vida.

A Ivi, mi compañera, mi amor, por estar a mi lado, soportándome y brindándome su amor. Y también agradecer a su familia, Mabel, Hugo, Nicolás, Martín.

A mis amigos y compañeros de trabajo, Leandro, Emilio, Jimena, Florencia(s), Juan Pablo(s), Macarena, Yael, Ignacio, Cristian, Brenda, Simón, Victoria, Javier, Gonzalo, Marina, Juanita, Lorena, Lucas, Rodrigo, Joaquin, Luciano, Damián, Gustavo, Nélida, Liliana y a la gente del TEF. Ellos han estado acompañándome en este camino, haciéndolo más ameno.

A Favio y Lilia, por estar siempre pendientes, brindándome su confianza, dedicación y guiándome en esta etapa. Cada palabra, consejo, enseñanza, no solo se encuentra plasmada en esta Tesis, sino también en mi crecimiento.

También quiero agradecer a Analía, Gabriel y Juan Carlos, por su tiempo y ayuda en estos años.

Por último, a todas las personas que he conocido en esta etapa, y como siempre a Dios, por permitirme cumplir una nueva meta.

Publicaciones

El trabajo realizado en esta Tesis se enmarca dentro del contexto de proyectos que contemplan el estudio fotométrico y espectroscópico de sistemas de cúmulos globulares extragalácticos y de galaxias de tipo temprano. Parte del trabajo desarrollado aquí, ha sido presentado en diversos congresos y publicado en revistas nacionales e internacionales:

“An extended star formation history in an ultra compact dwarf”.

Norris, Mark A.; Escudero, Carlos G.; Faifer, Favio R.; Kannappan, Sheila J.; Forte, Juan C.; van den Bosch, Remco C., 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 451, 3615

“The extremely populated globular cluster system of the lenticular galaxy NGC 6861”.

Escudero, Carlos G.; Faifer, Favio R.; Bassino, Lilia P.; Calderón, Juan P.; Caso, Juan P., 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 449, 612

“Comparación fotométrica en imágenes Gemini/GMOS”.

Escudero, Carlos G.; Sesto, Leandro A.; González, Nélica M.; Faifer, Favio R.; Smith Castelli, A.; Forte, Juan C., 2015, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, 57, 19

“Estudio del sistema de cúmulos globulares de la galaxia lenticular NGC 6861”.

Escudero, Carlos G.; Faifer, Favio R.; Bassino, Lilia P.; Calderón, Juan P.; Caso, Juan P., 2013, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, 2013, 56, 69

Presentaciones a Congresos

“The globular cluster system of the galaxy NGC 4546”.

Escudero, Carlos G.; Faifer, Favio R.; Norris, Mark A.; Forte, Juan C., 2015. Congreso: Future & Science of Gemini Observatory, Toronto, Canadá.

“Globular cluster systems: clues to the origin of lenticular galaxies”.

Escudero, Carlos G.; Faifer, Favio R.; Bassino, Lilia P., 2015. Congreso: 15 Años de Ciencia con Gemini en Argentina, La Plata, Argentina.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Resumen

Subpoblaciones de cúmulos globulares: claves sobre la formación de galaxias de tipo temprano en grupos y el campo

por Carlos Gabriel Escudero

Existe en la actualidad cierto consenso de que los cúmulos globulares (CGs) se formaron en eventos intensos de formación estelar. Si bien no ha sido explicado satisfactoriamente aún, tanto los estudios de los CGs de nuestra galaxia, como el análisis espectroscópico de distintos sistemas de CGs extragalácticos, han mostrado que casi la totalidad de los CGs que observamos hoy en día se formaron durante las primeras etapas del ensamble de las galaxias a las que pertenecen. Por otro lado, si bien se sabe actualmente que muchos, si no es que todos, los CGs presentan múltiples poblaciones estelares, estos continúan siendo los ejemplos más parecidos a poblaciones estelares simples. La razón de ello radica en que, en cualquier caso, todos los CGs poseen una población estelar dominante, la cual se formó en una escala de tiempo corta, y en base a material químicamente homogéneo. Dicha población domina las propiedades integradas de estos objetos en cuestión. Estas características, sumadas al hecho de que, a excepción de algunas galaxias que pueblan el extremo débil de la función de luminosidad, todas poseen un sistema de CGs detectable, han motivado que durante las últimas décadas se haya extendido ampliamente el estudio de dichos sistemas, con el objeto de obtener información sobre las primeras etapas de la formación de las galaxias.

En este contexto, con la aparición en los '90 de los telescopios de gran superficie colectora, se han realizado numerosos estudios de sistemas de CGs, y se han establecido ya varias propiedades que caracterizan a dichos sistemas. Entre ellas, las distribuciones de color integrado y las distribuciones espaciales, las cuales han llevado a identificar la presencia de distintas subpoblaciones de CGs tal y como ocurre en nuestra propia Vía Láctea. De la misma forma, también se han comenzado a realizar estimaciones de edades y metalicidades, que junto con las medidas de velocidades radiales han aportando tanto en dar respuestas a algunos interrogantes, como también en generar nuevas preguntas que aún no han sido respondidas.

Entre los hallazgos de los estudios antes mencionados se encuentra el hecho de que el número de CGs que posee una galaxia muestra una clara relación con la masa total de las mismas, y que son las de tipo temprano aquellas que poseen un mayor número de

estos objetos, y que además, es en ellas donde resultan más fácilmente identificables. Estas consideraciones explican por qué la mayoría de los estudios de sistemas de CGs a la fecha se han centrado en galaxias elípticas masivas en ambientes de cúmulos. En tal circunstancia, resulta obvio entonces que se conoce muy poco sobre las propiedades de los sistemas pertenecientes a galaxias de tipo tardío, así como también, de aquellos sistemas pertenecientes a galaxias elípticas y lenticulares (S0) en ambientes menos densos.

El material observacional con que se trabajó en esta Tesis está integrado por imágenes profundas obtenidas a través de los filtros g' , r' e i' (además de z' para una de las galaxias) de varios campos centrados en diversas galaxias S0. Además de ello, se trabajó con datos de tipo espectroscópico en modo multi-objeto para una de las galaxias, habiéndose determinado edades y metalicidades para una submuestra de objetos, empleando los índices de Lick, y la comparación con modelos de poblaciones estelares simples.

En este contexto, el objetivo general de esta Tesis fue el de caracterizar diferentes sistemas de CGs pertenecientes a galaxias S0 ubicadas en ambientes poco densos. El aporte en cuanto al estudio de las galaxias de tipo temprano de la muestra en particular, consistió principalmente en determinar la presencia o no de distintas subpoblaciones de CGs. La información obtenida a partir del estudio de estos sistemas en conjunto con el análisis fotométrico de sus galaxias anfitrionas, nos ha permitido ampliar el conocimiento general de los mismos. Por otra parte, la base fotométrica aquí presentada, por su homogeneidad, constituye por si misma un aporte importante, ya que servirá como punto de partida para trabajos espectroscópicos futuros. Se espera que, en el trabajo futuro, todo lo aquí presentado ayude a delinear los procesos que gobiernan la formación y evolución de las galaxias y sus sistemas de CGs.

Índice General

Agradecimientos	v
Publicaciones	vii
Resumen	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tablas	xxv
1 Introducción	1
1.1 Galaxias lenticulares	1
1.2 Cúmulos globulares	5
1.3 Esta Tesis	8
2 Muestra de galaxias	9
3 Observaciones y reducción de los datos	15
3.1 Observaciones	15
3.2 Reducción de los datos	20
4 Clasificación de objetos y fotometría	23
4.1 Clasificación de objetos	23
4.2 Fotometría	27
5 Calibraciones fotométricas y experimentos de completitud	31
5.1 Puntos de cero medios	31
5.2 Términos de color para GMOS-S	42
5.3 Comparación con SDSS y los términos de color de GMOS-N	44
5.4 Estimaciones de completitud	51
6 Análisis fotométrico de las galaxias de la muestra	57
6.1 Perfiles de brillo superficial de las galaxias	57
6.2 Análisis isofotal	63
7 Selección de candidatos a cúmulos globulares	85
7.1 Diagramas color-magnitud y color-color	85
7.2 Campos de comparación	93

8 Distribución de color integrado	101
8.1 Histogramas de color integrado	101
9 Distribución espacial	123
9.1 Distribución proyectada sobre el plano del cielo	123
9.2 Distribución acimutal y perfiles de densidad	133
10 Tendencias radiales	149
10.1 Comparación con el halo de las galaxias	149
11 Función de luminosidad	159
11.1 Funciones de luminosidad globales	159
11.1.1 Efectos de la metalicidad sobre las funciones de luminosidad	170
12 Número total de CGs y frecuencia específica	179
13 Estudio complementario en NGC 6861	185
13.1 Relación color-luminosidad	185
13.2 Comparación con la emisión del gas caliente	188
14 Poblaciones estelares en NGC 4546	191
14.1 Introducción	191
14.2 Observaciones y reducción de los datos	192
14.3 Cinemática	196
14.4 Índices de Lick	200
14.5 Poblaciones estelares	201
14.6 Historia de formación estelar de NGC 4546-UCD1	205
15 Conclusiones	209
15.1 Trabajo a futuro	218
A Comparación fotométrica	219
A.1 Introducción	219
A.1.1 Construcción del modelo PSF	220
A.1.2 Diagramas color-magnitud	223
A.1.3 Comparación en bandas fotométricas	225
A.1.4 Clasificación	225
A.1.5 Conclusiones	227
Bibliografía	229

Índice de Figuras

2.1	Imágenes DSS2 centradas en las galaxias de la muestra.	13
3.1	Imagen GMOS-N de un campo aledaño a la galaxia NGC 2549.	16
3.2	Orientación de los campos GMOS observados.	18
3.2	Continuación.	19
3.3	Patrón de <i>fringing</i> observado sobre la imagen cruda de GMOS-S.	21
4.1	Índices <i>class_star</i> y <i>spread_model</i> en función de la magnitud para los objetos detectados en el campo de NGC 3414.	25
4.2	Proceso utilizado por SExtractor sobre la imagen de NGC 6861.	27
5.1	Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 2549.	35
5.2	Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 2880.	36
5.3	Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 2612.	37
5.4	Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 4546.	38
5.5	Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 3414.	39
5.6	Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 5838.	40
5.7	Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 6861.	41
5.8	Comparación fotométrica de objetos puntuales en común entre la fotometría GMOS-N de NGC 2549, y la obtenida de SDSS DR12.	45
5.9	Ídem para NGC 2880.	46
5.10	Comparación fotométrica de objetos puntuales en común entre la fotometría GMOS-N de NGC 3414, y la obtenida de SDSS DR12.	47
5.11	Comparación fotométrica de objetos puntuales en común entre la fotometría GMOS-N de NGC 5838, y la obtenida de SDSS DR12.	48
5.12	Fracción de completitud en función de la magnitud y en función del radio galactocéntrico.	53
5.12	Continuación	54

5.12	Continuación.	55
6.1	Perfiles de brillo superficial radial para las galaxias de la muestra.	61
6.1	Continuación.	62
6.2	Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 2549.	64
6.3	Isofotas, imagen residual y mapa de color de NGC 2549.	66
6.4	Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 2880.	67
6.5	Isofotas, imagen residual y mapa de color de NGC 2880.	69
6.6	Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 2612.	70
6.7	Isofotas, imagen residual y mapa de color de NGC 2612.	72
6.8	Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 4546.	73
6.9	Isofotas, imagen residual y mapa de color de NGC 4546.	74
6.10	Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 3414.	75
6.11	Isofotas, imagen residual y mapa de color de NGC 3414.	77
6.12	Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 5838.	78
6.13	Isofotas, imagen residual y mapa de color de NGC 5838.	80
6.14	Imagen g' de NGC 5838 obtenida mediante el método <i>unsharp-mask</i>	81
6.15	Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 6861.	82
6.16	Isofotas, imagen residual y mapa de color de NGC 6861.	83
7.1	Errores fotométricos para los diferentes índices de color.	86
7.2	Diagramas color-color y color-magnitud de los objetos puntuales con errores $\epsilon(g'-i') < 0.1$ mag.	87
7.2	Continuación	88
7.2	Continuación.	89
7.3	Diagramas color-magnitud de la muestra final de candidatos a CGs. . . .	91
7.3	Continuación.	92
7.4	Diagramas color-magnitud correspondientes a los campos de comparación utilizados para NGC 3414 y NGC 6861.	94
7.5	Distribución espacial de los objetos sobre el campo de NGC 6845.	95
7.6	Regiones utilizadas para estimar la contaminación.	96
7.7	Diagramas color-magnitud de los objetos puntuales presentes en las regiones consideradas para estimar la contaminación.	97
7.8	Diagrama color-magnitud obtenido a partir de la simulación TRILEGAL y el obtenido para el campo de comparación de NGC 7626.	99

8.1	Histogramas de color para la muestra de candidatos a CGs en las diferentes galaxias.	102
8.1	Continuación	103
8.1	Continuación	104
8.2	Histograma de color $(g'-i')_0$ correspondiente al sistema de CGs de la galaxia lenticular NGC 3115.	106
8.3	Histogramas de color corregidos por contaminación para NGC 2549. . . .	108
8.4	Histogramas de color corregidos por contaminación para NGC 2880. . . .	110
8.5	Histograma de color de NGC 2612.	111
8.6	Histogramas de color $(g'-i')_0$ corregidos por contaminación para NGC 4546. . . .	112
8.7	Histogramas de color $(g'-z')_0$ corregidos por contaminación para NGC 4546. . . .	113
8.8	Histogramas de color $(g'-i')_0$ y $(g'-z')_0$ corregidos por contaminación en NGC 4546.	114
8.9	Histograma de color corregido para NGC 3414.	115
8.10	Histogramas de color corregidos por contaminación para NGC 3414. . . .	116
8.11	Histogramas de color corregidos por contaminación para NGC 5838. . . .	118
8.12	Histogramas de color corregidos por contaminación para NGC 6861. . . .	120
8.13	Histograma de color corregido para NGC 6861.	121
9.1	Distribución espacial de los candidatos a CGs.	124
9.1	Continuación.	125
9.2	Distribución espacial proyectada de las subpoblaciones de CGs azul y roja de NGC 2549.	126
9.3	Distribución espacial proyectada de los candidatos a CGs con colores $(g'-i')_0 < 0.71$ mag y las subpoblaciones azul y roja en NGC 2880.	127
9.4	Distribución espacial proyectada de los candidatos a CGs en NGC 2612. . .	128
9.5	Distribución espacial proyectada de las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 4546.	129
9.6	Distribución espacial proyectada de las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 3414.	130
9.7	Distribución espacial proyectada de las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 5838.	131
9.8	Distribución espacial proyectada de las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 6861.	133
9.9	Perfiles de densidad corregidos por contaminación y completitud areal considerando anillos circulares.	135
9.9	Continuación	136
9.10	Distribución acimutal de los candidatos a CGs para las galaxias de la muestra.	138
9.10	Continuación	139
9.11	Perfiles de densidad corregidos por contaminación y completitud areal considerando anillos elípticos.	140

9.11 Continuación	141
9.11 Continuación	142
9.11 Continuación	143
9.12 Perfiles de densidad corregidos por contaminación y completitud areal para cada subpoblación de CGs.	146
9.12 Continuación	147
9.12 Continuación	148
10.1 Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada en NGC 2549.	151
10.2 Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada en NGC 2880.	152
10.3 Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada en NGC 2612.	152
10.4 Color $(g' - z')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada en NGC 4546.	153
10.5 Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada en NGC 3414.	154
10.6 Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada en NGC 5838.	155
10.7 Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada en NGC 6861.	157
11.1 Histogramas crudos de la distribución de luminosidad para los diferentes sistemas de CGs.	161
11.1 Continuación	162
11.2 FLCG corregida de NGC 2549.	163
11.3 FLCG corregida obtenida para las subpoblaciones azul y roja de NGC 2549.	164
11.4 FLCG corregida de la muestra total de CGs y de la subpoblación azul de NGC 2880.	165
11.5 FLCG corregida de NGC 2612.	167
11.6 FLCG corregida de NGC 4546.	168
11.7 FLCG corregida de NGC 3414.	169
11.8 FLCG corregida de NGC 5838.	169
11.9 FLCG corregida de NGC 6861.	170
11.10 FLCG corregida para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 4546.	171
11.11 FLCG corregida para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 3414.	173
11.12 FLCG corregida para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 5838.	174
11.13 FLCG para la subpoblación azul, intermedia y roja en NGC 6861.	175
13.1 <i>Blue-tilt</i> en NGC 6861.	187
13.2 Perfil de densidad proyectado de la subpoblación azul y perfil de brillo superficial en rayos-X de NGC 6861.	190
14.1 Imagen en la banda g' de NGC 4546, con las posiciones de los objetos confirmados como CGs y objetos de fondo.	193
14.2 Espectros correspondientes a tres CGs confirmados de NGC 4546.	195
14.3 Histograma de velocidades de los objetos medidos en NGC 4546.	197
14.4 Espectro integrado de la NGC 4546-UCD1.	199

14.5 Diagrama color-magnitud de NGC 4546, con los CGs/UCD confirmados espectroscópicamente.	202
14.6 Diagramas de diagnóstico.	203
14.7 Diagramas $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. edad y $[\text{Z}/\text{H}]$ vs. edad para los trece CGs confirmados y la UCD.	204
14.8 Diagramas edad- $(g' - z')_0$ y $[\text{Z}/\text{H}] - (g' - i')_0$ para los CGs/UCD confirmados.	204
14.9 Historia de formación estelar de NGC 4546-UCD1.	207
A.1 Radio efectivo en función de la magnitud para las fuentes detectadas en el campo de NGC 3414.	221
A.2 Objetos puntuales utilizados por PSFEx para realizar el modelo de PSF.	222
A.3 Diagramas color-magnitud e histogramas de color para la muestra de candidatos a CGs correspondientes a DAOPHOT y PSFEx.	224
A.4 Diferencias de magnitudes obtenidas por DAOPHOT y PSFEx en los filtros g' e i'	225
A.5 Diagramas de clasificación de objetos empleando <i>class_star</i> y <i>spread_model</i>	226
A.6 Clasificación realizada por SExtractor+PSFEx sobre los objetos detectados en NGC 4546.	227

Índice de Tablas

2.1	Datos de las galaxias.	10
3.1	Observaciones.	17
5.1	Campos de estándares utilizados en las diferentes galaxias.	32
5.2	Calibraciones para llevar al sistema estándar (parte 1).	34
5.3	Calibraciones para llevar al sistema estándar (parte 2).	43
5.4	Magnitudes límites correspondientes a una completitud de 80%.	52
7.1	Número final de candidatos a CGs en cada galaxia.	90
8.1	NGC 2549. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color.	109
8.2	NGC 2880. Valores obtenidos por GMM y RMIX para la distribución de color.	110
8.3	NGC 4546. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color.	114
8.4	NGC 3414. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color.	117
8.5	NGC 5838. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color.	119
8.6	NGC 6861. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color.	121
9.1	Valores de las pendientes obtenidos en cada galaxia, mediante el ajuste de una ley de potencia y una ley de de Vaucouleurs, sobre los perfiles de densidad considerando anillos circulares y elípticos.	137
9.2	Valores de ángulo de posición y elipticidad obtenidos para cada sistema de CGs, incluyendo los valores medidos para la luz de la galaxia.	143
9.3	Valores de las pendientes obtenidas para cada subpoblación de CGs, mediante el ajuste de una ley de potencia y una ley de de Vaucouleurs sobre los perfiles de densidad.	144
10.1	Gradientes de color obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 4546.	154
10.2	Gradientes de color obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 3414.	155
10.3	Gradientes de color obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 5838.	156

10.4 Gradientes de color obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 6861.	156
11.1 Valores de TO y σ para la subpoblación azul, intermedia y roja de NGC 4546.	171
11.2 Valores de TO y σ para la subpoblación azul, intermedia y roja de NGC 3414.	172
11.3 Valores de TO y σ para la subpoblación azul, roja y con colores más rojos de NGC 5838.	173
11.4 Valores de TO y σ para la subpoblación azul, intermedia y roja de NGC 6861.	175
12.1 Población total de CGs y frecuencia específica para cada galaxia.	180
14.1 Parámetros espectro-fotométricos obtenidos para los CGs/UCD confirmados en NGC 4546.	197
14.2 Definición de los 25 índices de Lick.	201
14.3 Parámetros de poblaciones estelares para los CGs/UCD confirmados en NGC 4546.	205

Capítulo 1

Introducción

1.1 Galaxias lenticulares

Los diferentes procesos físicos que conducen a la formación y evolución de las galaxias, los cuales resultan a menudo poco conocidos, constituyen un área de investigación muy importante en astronomía extragaláctica y en cosmología observacional. En tal contexto, un aspecto fundamental radica en identificar aquellos factores más influyentes en la formación y evolución de las galaxias de un dado tipo morfológico. En la clasificación de Hubble (1936), las galaxias lenticulares (S0) fueron ubicadas entre las galaxias elípticas y espirales. En este sentido, se aceptó que los objetos de este tipo tenían que poseer discos estelares similares a los observados en galaxias espirales, pero sin mostrar regiones de formación estelar o algún patrón espiral. Por otro lado, su color rojizo probablemente debido a estrellas viejas en promedio, hace que las S0 se vean similares a las galaxias elípticas. La posición intermedia de las galaxias S0 entre los sistemas estelares puramente esferoidales y las galaxias espirales, donde la contribución del bulbo a la luminosidad total disminuye monótonamente con la transición de tipos tempranos a tardíos (desde izquierda hacia derecha a lo largo de la secuencia morfológica de Hubble), da lugar a una suposición natural que las mismas deben poseer bulbos prominentes. Sin embargo, estudios fotométricos detallados de la distribución de brillo superficial muestran que los bulbos de este tipo de galaxias pueden presentarse grandes o bien pequeños (Laurikainen et al., 2010).

Históricamente existen esencialmente dos puntos de vista principales sobre el origen de las galaxias S0: 1) las S0 son el producto final de la transformación de galaxias espirales cuyo contenido de gas fue removido por medio de fuerzas gravitacionales o no gravitacionales, o por evolución secular; 2) la clase S0 es intrínseca, es decir, formada por objetos que difieren de las espirales desde su formación.

Los impulsores del primer punto de vista encontraron apoyo en los siguientes hechos observacionales:

- Una fracción significativa de las galaxias de tipo temprano de hoy, probablemente hayan evolucionado a partir de galaxias de tipo tardío en épocas relativamente recientes. Observaciones del Telescopio Espacial Hubble (HST, por sus siglas en inglés) revelaron que las galaxias espirales son proporcionalmente mucho más comunes (un factor $\sim 2-3$), que las galaxias S0 en cúmulos distantes, en comparación con cúmulos cercanos (Dressler et al. 1997; Fasano et al. 2000; Treu et al. 2003; Postman et al. 2005; Smith et al. 2005; Desai et al. 2007)
- Existen varias evidencias de que las galaxias espirales son despojadas de su gas HI en ambientes densos (Davies & Lewis 1973; Haynes et al. 1984; Giovanelli & Haynes 1985; Solanes et al. 2001; Koopmann & Kenney 2004; Crowl et al. 2005; Chung et al. 2007; Sun et al. 2007; Yagi et al. 2007; Rasmussen et al. 2008; Vollmer et al. 2009; Yoshida et al. 2008; Smith et al. 2010; Sivanandam et al. 2010), transformándose rápidamente en S0 debido al cese de su formación estelar (Boselli & Gavazzi 2006; Book & Benson 2010; Fabello et al. 2011; Gonçalves et al. 2012; Mendel et al. 2013; Bekki 2014; Hirschmann et al. 2014; Wu et al. 2014).
- En los pocos casos estudiados, la frecuencia específica (S_N , definida como el cociente entre el número total de cúmulos globulares (CGs) y la luminosidad de la galaxia que los alberga normalizada a $M_V = -15$) en las actuales S0, es consistente con la idea de que estas galaxias se forman cuando el gas en galaxias espirales normales es removido (Barr et al., 2007).
- Las relaciones masa-metalicidad observadas en galaxias S0 son consistentes con una formación mediante fusiones (Prochaska Chamberlain et al., 2011).
- La cinemática estelar de galaxias S0 inferidas mediante Nebulosas Planetarias parece consistente con las de espirales, indicando que las mismas podrían evolucionar directamente a dichos sistemas a través de la extracción de gas o evolución secular (Cortesi et al., 2011).

Por el otro lado, los partidarios del segundo punto de vista afirman que:

- Los cocientes bulbo-disco (B/D) de las dos clases morfológicas (lenticulares y espirales) son demasiado diferentes para ser explicados por la simple ocurrencia de la extracción de gas (Burstein, 1979). Si las S0 evolucionan de espirales, la luminosidad del bulbo debe aumentar (Christlein & Zabludoff, 2004).
- Muchas de las galaxias S0 vistas *edge-on* se caracterizan por tener discos gruesos los cuales se encuentran ausentes en las muestras de control de espirales.

- La relación entre la densidad y morfología es una función débil de la densidad superficial de galaxias circundantes para las S0, de modo que un porcentaje significativo de S0s se encuentran en regiones donde la densidad y temperatura es muy baja para despojar significativamente el gas (Dressler, 1980).
- Las altas edades y la sobreabundancia de magnesio-hierro en los discos externos de S0s cercanas, contradicen el escenario comúnmente aceptado de la formación de las S0, en el cual galaxias espirales cesan su formación estelar durante la acreción en ambientes densos a *redshifts* $z = 0.4 - 0.5$ ($4 - 5 \times 10^9$ años) (Sil'chenko et al., 2012).
- La evolución en el número de S0s de $z = 0.4 - 0.5$ a $z = 0$ es el resultado de errores durante la clasificación morfológica (Andreon, 1998).
- Ni la elipticidad media, ni la forma de la distribución de la elipticidad de galaxias de tipo temprano en cúmulos, evolucionan con el *redshift* de $z \sim 0$ a $z > 1$, es decir durante los últimos 8×10^9 años (Holden et al., 2009). Esto sugiere que la distribución del cociente B/D para galaxias de tipo temprano en cúmulos no cambia con el tiempo.

En el último tiempo comenzó a resurgir la idea propuesta por van den Bergh (1976), según la cual en el esquema morfológico de Hubble, las galaxias S0 constituyen de hecho una secuencia morfológica paralela a la secuencia de las galaxias espirales, igualando los cocientes B/D en cada subtipo morfológico (Kormendy & Bender 2012; Cappellari et al. 2011). En este sentido, la contribución del bulbo con respecto a la luminosidad total en una galaxia S0 será similar a la de una galaxia espiral situada cerca en el diagrama morfológico. De este modo, se deja abierta la posibilidad de una transformación inversa, es decir, la transformación de una S0 en una espiral mediante la adquisición de gas y la posterior ignición de formación estelar (Katkov et al., 2014).

Todos los procesos físicos mencionados en la literatura, y que podrían causar el cese de formación estelar en discos de galaxias espirales, y comenzar la transición hacia las S0, se centran principalmente en ambientes densos como cúmulos. Algunos de los mismos son:

- (i) La pérdida de gas provocada por vientos galácticos como consecuencia de formación estelar o núcleos activos (AGN, por sus siglas en inglés) (Veilleux et al. 2005; Ho et al. 2014; Fogarty et al. 2012), el *ram pressure stripping*, siendo uno de los factores más importantes en el cual el gas neutro interestelar de la galaxia interactúa con el gas caliente intra-cúmulo (Gunn & Gott, 1972; Bekki, 2014), estrangulación, es decir la eliminación del gas caliente del halo que rodea a la galaxia a través de *ram pressure stripping* o por fuerzas tidales por el potencial del halo (Larson et al.

1980; Balogh et al. 2000), evaporación térmica (Cowie & Songaila, 1977), y efectos turbulentos/viscosos (Nulsen, 1982).

- (ii) Por otro lado, también las fuertes interacciones tidales y fusiones, aunque esto es más frecuente en grupos de galaxias que en cúmulos (Barnes & Hernquist 1992; Mazzei et al. 2014a,b), y el *harassment*, es decir el efecto acumulativo de sucesivos encuentros rápidos (Moore et al., 1996).

Si bien muchos de estos mecanismos podrían explicar el origen de la mayoría de las galaxias S0 en cúmulos, difícilmente pueden justificar la existencia de las mismas en ambientes de baja densidad, como el “campo” o grupos poco densos. La existencia de galaxias S0 aisladas, de luminosidad comparable a la de aquellas ubicadas en cúmulos, indica que dichas S0 deberían haberse formado mediante mecanismos diferentes a los anteriormente enumerados. Uno de ellos se centra en la evolución secular para transformar espirales a S0. Esta idea se encuentra apoyada en el hecho de que muchas de las S0 en estos ambientes poseen pseudo-bulbos (Laurikainen et al. 2006; Graham 2013), es decir, bulbos con cocientes bulbo-luminosidad total y concentraciones típicas de galaxias espirales de tipo tardío ($B/T < 0.2$ y $n \sim 1$, este índice mide cuán compacta resulta una galaxia). Estos bulbos contienen usualmente discos, algún patrón espiral interno, barras nucleares, formación estelar y/o presentan rotación similar al bulbo de espirales (Kormendy & Kennicutt, 2004). Estas propiedades se suelen atribuir a la evolución inducida por barras, las cuales envían el material hacia el centro de la galaxia, enriqueciendo la componente de bulbo (Pfenniger & Norman, 1990). La evolución secular ofrece también un mecanismo viable para originar un disco grueso observado en muchas de las galaxias S0 *edge-on*.

Otro de los mecanismos utilizado para explicar la existencia de galaxias S0 en estos ambientes de baja densidad, se centra en la hipótesis de fusiones (Biermann & Tinsley, 1975). Esta posibilidad encontró apoyo en el descubrimiento de “anillos polares”, originados como consecuencia de una transferencia de masa de una compañera durante un encuentro cercano o fusión (Schweizer et al., 1983). Bekki (1997) destacó que una configuración de órbita particular podría transformar dos espirales en una S0 con anillos polares (ver también Mapelli et al. 2015). Una fenomenología relacionada observada en este tipo de galaxias, es una componente de gas cinemáticamente desacoplada con respecto a la componente estelar de la galaxia (Bertola et al., 1992). Aún más, las simulaciones numéricas de Bekki (1998) indican que el principal mecanismo es la fusión entre dos galaxias espirales con masa desigual; de ser cierto esto, las fusiones de galaxias con masas desiguales proporcionan un vínculo evolutivo entre el gran número de espirales azules observadas a *redshift* intermedios y las S0 rojas presentes en la actualidad. Los estudios realizados por Sil’chenko et al. (2011) y Zasov et al. (2013) mostraron que las galaxias aisladas NGC 7217 y NGC 4124 presentaron diferentes eventos de fusiones menores durante los últimos 5×10^9 años y $2 - 3 \times 10^9$ años, respectivamente.

1.2 Cúmulos globulares

Una importante herramienta para el estudio de la formación y evolución de las galaxias, se basa en los sistemas de CGs asociados a las mismas. Los CGs se encuentran entre los sistemas estelares más antiguos encontrados en el Universo (Chaboyer et al. 1998; Brodie & Strader 2006) y, como tales, permiten examinar las primeras etapas de la formación de las galaxias. En sí mismos, los CGs son sistemas relativamente simples, siendo sistemas ligados gravitacionalmente de 10^4 a $10^6 M_{\odot}$ (luminosidades de $M_V \sim -10$ a -5), las cuales se formaron al mismo tiempo y en la misma nube de gas y polvo. Resulta claro que no es posible formar una población estelar de forma instantánea, por lo que, vistos en detalle, se espera que las estrellas de los CGs muestren cierta dispersión en sus propiedades. Sin embargo, actualmente se sabe que muchos CGs de nuestra Vía Láctea muestran claramente varias secuencias principales, indicando que los mismos atravesaron diferentes etapas de formación estelar (por ejemplo D’Antona et al. 2005 para el caso de NGC 2808). Si bien en un primer momento se interpretó este comportamiento como indicativo de que dichos CGs con diversas secuencias principales no eran *bona fide* CGs, en la actualidad otro panorama mucho más complejo sobre la formación de cúmulos estelares masivos se ha ido delineando (Gratton et al., 2012). Más allá de estos aspectos, se debe mencionar que los CGs continúan siendo muy buenos análogos de las poblaciones estelares simples (SSPs, por sus siglas en inglés), ya que tanto sus propiedades integradas, como sus poblaciones individuales pueden ser aproximadas a primer orden por dichas poblaciones.

Desde el punto de vista observacional, los sistemas de CGs muestran diferentes particularidades, entre las que se destacan:

- (a) Las distribuciones de colores integrados de los CGs aparecen bimodales (Ostrov et al. 1998; Kundu & Whitmore 2001). Tratándose de sistemas estelares antiguos, existe consenso en que dicha bimodalidad estaría indicando la existencia de por lo menos dos poblaciones de CGs. Los “azules”, o de muy bajo contenido de metales, y los “rojos”, de relativamente mayor metalicidad.
- (b) Ambas familias de CGs muestran diferentes distribuciones espaciales. Los llamados rojos, se presentan más concentrados hacia la galaxia a la que pertenecen, mientras que los azules pueden encontrarse incluso a más de 100 kpc de las mismas (Bassino et al., 2006). Se puede mencionar además que, aunque no en todos los casos, los CGs rojos usualmente muestran una distribución espacial y colores que resultan muy similares a los presentados por la componente estelar difusa de la galaxia (Bassino et al. 2008; Faifer et al. 2011). Este aspecto se encuentra estrechamente relacionado al punto (d) mencionado más abajo y ha sido analizado en una serie de trabajos (Forte et al. 2005, 2007, 2009, 2012). Existe, además, una clara relación

entre la posición del pico rojo y la luminosidad (masa) de la galaxia a la que pertenecen (Peng et al., 2006).

- (c) Si bien los CGs azules muestran propiedades que resultan más “universales” que las de los rojos, se ha detectado la existencia de una relación masa-luminosidad en los primeros, que ha recibido el nombre de *blue-tilt* y que curiosamente no se detecta en todos los sistemas de CGs estudiados (Harris et al. 2006; Strader et al. 2006; Mieske et al. 2006b; Spitler et al. 2006; Forte et al. 2007; Faifer et al. 2011).
- (d) La forma exacta de la relación genética entre los CGs y las estrellas de las galaxias a las que estos pertenecen ha sido materia de discusión por muchos años. Forte et al. (2005, 2007) han ensayado con éxito una serie de hipótesis que se basan en la idea de que cada vez que se forma un CG, también se crea una masa de estrellas que comparte la distribución espacial, edad y metalicidad de estos. Estas hipótesis han sido aplicadas con éxito más recientemente en una extensión de los mencionados trabajos, haciendo uso de la base de datos de *Advanced Camera for Survey* (ACS) del Telescopio Espacial Hubble (Forte et al., 2009), y en un profundo análisis de la capacidad “trazadora” de los CGs en el caso de la galaxia M87 (Forte et al., 2012).
- (e) Finalmente, un ingrediente extra en discusión, muy vigente en la actualidad, es la posibilidad planteada por algunos autores de que la mencionada bimodalidad en colores integrados no necesariamente tenga origen en la presencia de múltiples poblaciones de CGs, sino más bien en la no linealidad de las relaciones color-metalicidad (Yoon et al., 2006). La importancia de este aspecto reside en el obvio impacto que esto tiene sobre los modelos de formación de galaxias. Dicha posibilidad, sin embargo, no parece estar en acuerdo con resultados más recientes donde es posible inferir la existencia de múltiples poblaciones de CGs (Forte et al., 2013), ni tampoco con estudios cinemáticos detallados (Pota et al., 2013).

Al igual que en los estudios de las propiedades integradas de galaxias, se ha producido una expansión en el estudio espectroscópico de los CGs, a pesar de la dificultad de examinar objetos relativamente débiles a distancias extragalácticas. Las enormes superficies colectoras de telescopios como Gemini y facilidades multi-objeto, permiten obtener estimaciones de edades y metalicidades de objetos ubicados a decenas de Mpc mediante el empleo de los llamados Índices de Lick (Worthey & Ottaviani 1997; Trager et al. 1998), y los modelos de síntesis de poblaciones estelares (Thomas et al., 2004). Dichas estimaciones confirman, por un lado, que los CGs en otras galaxias presentan propiedades similares a los de la Vía Láctea, y por el otro, muestran la existencia de matices que hacen necesaria la ampliación de tales estudios (Pierce et al. 2006a,b; Norris et al. 2008).

En tal contexto, coexisten varios escenarios para la formación de los sistemas de CGs que han sido propuestos hace ya más de una década. Entre ellos, se pueden destacar los siguientes: (i) la de “fusión mayor” (Ashman & Zepf, 1992), que proponen que la fusión de dos galaxias espirales da lugar a una elíptica, con cúmulos azules donados por las espirales y rojos formados durante la fusión; (ii) la de “colapso con disipación multi-fase” (Forbes et al., 1997), que sugiere que la formación de CGs azules en fragmentos gaseosos es truncada (por la reionización cósmica, Cen 2001) y en una segunda fase se forman los CGs rojos y las estrellas de campo de la galaxia; y (iii) el escenario de acreción (Côté et al., 1998), donde los CGs rojos se forman en una galaxia semilla masiva y los azules son posteriormente acretados junto con galaxias satélites de menor masa.

Cada uno de estos escenarios han mostrado diferentes grados de éxito y dificultades al intentar explicar las observaciones, por lo que es razonable suponer que la formación de los sistemas de CGs incluya ingredientes de cada una de ellos. Asimismo, en los últimos años ha quedado en evidencia la necesidad de incluir estos escenarios en un marco cosmológico adecuado. En tal sentido Beasley et al. (2002) proponen un modelo semi-analítico acorde con el *merging jerárquico*, en el que los CGs azules se forman en discos proto-galácticos dentro de halos de materia oscura, luego esta formación es truncada (por la reionización) y los CGs rojos se forman posteriormente en fusiones con abundante gas. Más recientemente se han propuesto modelos que suponen que los CGs trazan la formación estelar y tienen en cuenta el enriquecimiento químico y la distribución radial proyectada de los CGs respecto a su galaxia madre (Pipino et al., 2007). Por su parte, Muratov & Gnedin (2010) han propuesto un modelo semianalítico cuya ventaja radica en que la bimodalidad surge naturalmente como resultado de los procesos de fusión a lo largo de la evolución de los halos de materia oscura. Por último, Kruijssen (2015) presenta un nuevo modelo para el origen de los CGs, en el cual las poblaciones de cúmulos estelares se forman en los discos de alta presión de galaxias a *redshifts* $z > 2$, siguiendo una rápida fase de disrupción originada por perturbaciones tidales y/o *mergers* con otras galaxias, luego de la cual aquellos cúmulos sobrevivientes se distribuyen en los halos de las galaxias, donde permanecen hasta la actualidad. Sin embargo, como se mencionó previamente, no existe a la fecha una conclusión definitiva con respecto a estos diferentes modelos propuestos y es claro que es necesario aun incluir otros ingredientes en los mismos.

1.3 Esta Tesis

El empleo de los CGs como trazadores de distintas propiedades de las galaxias a las que pertenecen ha sido explorado con cierta profundidad por diversos autores en la literatura reciente (Harris 2009a,b; Forte et al. 2014). Sin embargo, como se mencionó antes, la mayoría de los sistemas de CGs bien estudiados pertenecen a galaxias masivas, de tipo temprano (principalmente elípticas), y en ambientes de cúmulos (básicamente Virgo y otros cúmulos del Universo cercano). En el caso particular de las galaxias de tipo S0, existen también en la literatura algunos ejemplos en los que se ha intentado aprovechar sus sistemas de CGs para poner a prueba las diferentes hipótesis sobre la formación de dicho tipo de galaxias (Kundu & Whitmore 2001; Larsen et al. 2001; Aragón-Salamanca et al. 2006; Barr et al. 2007; Hargis et al. 2011). Sin embargo, se puede apreciar en ellos que, por un lado, el número de sistemas estudiados y caracterizados de manera detallada en galaxias lenticulares es bajo. Por otro lado, la mayoría de dichas galaxias se encuentran en ambientes densos de cúmulos. Estos dos aspectos conducen indefectiblemente a resultados basados en extrapolaciones de propiedades, y con muestras sesgadas que hacen que las conclusiones de dichos estudios resulten poco sólidas.

Resulta necesario entonces, como primer paso, incrementar significativamente la muestra de sistemas de CGs estudiados en profundidad, principalmente en ambientes de baja densidad y pertenecientes, claro está, a galaxias de tipo lenticular. De esta forma, se deberán caracterizar dichos sistemas y evaluar si sus propiedades son o no similares a las de las espirales y elípticas. Una vez que la muestra sea representativa de las galaxias en distintos entornos, y se hayan delimitado sus propiedades, recién se podrán delinear conclusiones firmes.

En tal contexto, la caracterización de los diferentes sistemas de CGs pertenecientes a las galaxias estudiadas en esta Tesis, resulta el primer paso en la comprensión de la formación y evolución de las galaxias a las que pertenecen. En este sentido, las diversas propiedades observacionales, mostradas por las subpoblaciones de CGs a través del empleo de datos fotométricos y espectroscópicos, conforman las diferentes piezas del rompecabezas en la historia de las galaxias.

Por ello, el objetivo principal de esta Tesis se centra en caracterizar los sistemas de CGs aportando y ampliando al conocimiento general de tales sistemas en aquellas galaxias lenticulares ubicadas en ambientes de baja o relativamente baja densidad. A partir de esta información, se plantea si entre las propiedades particulares de dichos sistemas existen indicios que aporten información de si el ensamble y posterior evolución de las galaxias anfitrionas de dichos CGs ha sido “tranquila”, o han sufrido distintos brotes de formación estelar generados por fusiones menores o interacciones.

Capítulo 2

Muestra de galaxias

La muestra estudiada en esta Tesis, consiste en siete galaxias de tipo temprano, esencialmente catalogadas como lenticulares (S0), las cuales cubren un amplio rango de luminosidades, desde $M_V = -19.44$ a -21.27 mag (ver Tabla 2.1). Todas ellas se escogieron principalmente por encontrarse en ambientes de baja o relativamente baja densidad, ubicadas en un rango de distancia entre 10 y 50 Mpc. Esto último, con el fin de obtener una adecuada representación de su sistema de CGs dentro del campo de visión del instrumento utilizado para este estudio. En el caso de las galaxias NGC 2549, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861, las mismas forman parte de grupos. El tipo de grupos, en estos casos es variado, ya que NGC 5838 es miembro de un grupo rico, mientras que otros casos, como NGC 2549 integran grupos pobres. Por su parte, NGC 2880 y NGC 2612 corresponden a galaxias de campo. La Tabla 2.1 lista algunos datos correspondientes a las galaxias estudiadas, mientras que la Figura 2.1 muestra la carta buscadora de cada una de ellas.

A continuación, se presenta una breve descripción de las galaxias bajo estudio, con información relevante obtenida de estudios previos de la literatura:

NGC 2549: esta galaxia lenticular vista *edge-on*, es la galaxia central de un grupo de baja densidad o “grupo pobre”. Sil’chenko et al. (2012) estudiaron esta galaxia mediante espectroscopía de ranura larga. Dichos autores obtuvieron metalicidades y edades para el bulbo y disco de la misma, empleando modelos SSP. Para el bulbo obtienen una edad de $2 \pm 0.3 \times 10^9$ años, con $[Z/H] = 0.5$ y $[Mg/Fe] = 0.13$, mientras que en el caso del disco obtienen un gradiente de edades, aumentando de $6.5 \pm 0.5 \times 10^9$ años a 12×10^9 años entre ~ 3 kpc y ~ 5 kpc, y una disminución de la metalicidad en 0.15 dex. Parte de este comportamiento es atribuido a la probable presencia de una componente de anillo (Seifert & Scorza, 1996). La velocidad heliocéntrica y la dispersión de velocidades $v_r = 1019 \pm 14 \text{ km s}^{-1}$ y $\sigma_0 = 140 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$, respectivamente, fueron obtenidas por Denicoló et al. (2005). Se ha calculado, además, que el agujero negro central de esta

Galaxia	α_{J2000} (h:m:s)	δ_{J2000} (° :′ :″)	Tipo	M_V (mag)	$(m-M)_0$ (mag)	R_{ef} (″)	Dist. (Mpc)	Amb.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
NGC 2549	08:18:58.3	+57:48:10.9	SA0 ⁰ (r)	-19.44	30.50 ± 0.14	19.05	12.6	G*
NGC 2880	09:29:34.5	+62:29:26.0	SB0 ⁻	-20.17	31.70 ± 0.21	20.89	21.9	C
NGC 2612	08:33:50.1	-13:10:28.3	S0 ⁻	-20.20	$31.80 \pm -$	16.93	22.9	C
NGC 4546	12:35:29.5	-03:47:35.5	SB0 ⁻ (s)	-20.45	30.73 ± 0.14	25.12	14.0	G
NGC 3414	10:51:16.2	+27:58:30.3	S0 pec	-21.11	32.01 ± 0.33	23.98	25.2	G
NGC 5838	15:05:26.2	+02:05:57.6	SA0 ⁻	-21.24	32.17 ± 0.45	25.12	27.1	G*
NGC 6861	20:07:19.5	-48:22:13.0	SA(s)0 ⁻	-21.27	32.24 ± 0.36	17.70	28.1	G*

TABLA 2.1: Datos de las galaxias. Columnas: (2-3) coordenadas ecuatoriales obtenidas de *NASA Extragalactic Database* (NED, por sus siglas en inglés); (4) clasificación morfológica (NED); (5) magnitud absoluta V obtenida del *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (RC3; de Vaucouleurs et al. 1991); (6) módulo de distancia de Tonry et al. (2001) para NGC 2880, NGC 3414, NGC 6861; Tully et al. (2013) para NGC 2549, NGC 4546; Theureau et al. (2007) para NGC 5838 y Mould et al. (2012) para NGC 2612; (7) radio efectivo de RC3; (8) distancia obtenida a partir del módulo de distancia de la columna 6; (9) información sobre el ambiente en que se ubican (NED), G: miembro de grupo; G*: miembro de grupo confirmado con velocidad radial; C: galaxia de campo.

galaxia posee una masa de $M_{AN} = 0.14^{+0.01}_{-0.04} \times 10^8 M_{\odot}$ (Hartmann et al., 2014). El estudio realizado por Krajnović et al. (2005) empleando espectroscopía de campo integrado de la región central ($r < 25$ segundos de arco), revela dos componentes corrotantes en los mapas de velocidades: una componente central de rotación rápida y una componente externa de rotación lenta. El sistema de CGs de NGC 2549 no se encuentra explorado.

NGC 2880: esta galaxia S0 de campo presenta estudios espectroscópicos previos. Sil’chenko (2006) obtuvo estimaciones de metalicidades y edades en base a un análisis empleando los índices de Lick y modelos SSP del núcleo y el bulbo de la misma. Los valores obtenidos fueron $[Z/H] = +0.2$ y $[Z/H] = +0.1$, respectivamente, y edades para estas dos regiones de $8 - 9 \times 10^9$ años. Por otro lado, Erwin & Sparke (2003) encuentran un leve enrojecimiento en la zona central al visualizar el mapa de color, posiblemente debido a la presencia de un leve gradiente de metalicidad ($\Delta[Fe/H]/\Delta \log(r) = -0.26$) obtenido por Munn (1992). La luminosidad en X de esta galaxia obtenida por O’Sullivan et al. (2001) es de $L_X = 1.15 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$. De igual manera que NGC 2549, el sistema de CGs de esta galaxia no se encuentra explorado.

NGC 2612: existe poca información sobre esta galaxia en la literatura, siendo todavía incierta la estimación de su distancia. El valor obtenido y el cual se utilizará en esta Tesis (Tabla 2.1) se estimó en el trabajo de Mathieu et al. (2002) utilizando la velocidad sistémica, adoptando un valor de $H_0 = 80 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Debido a la ubicación galáctica en la que se encuentra esta galaxia, $l = 237^\circ 8' 3.4''$ y $b = 15^\circ 41' 37.1''$, esto es, casi sobre el plano de la Vía Láctea, es de esperar que la fotometría de objetos puntuales se encontrará afectada por una fuerte contaminación por estrellas (Figura 2.1). En cuanto a su ambiente, no se observan compañeras cercanas con brillo comparable a la misma al analizar imágenes del *Digitized Sky Survey* (DSS, por sus siglas en inglés) de las regiones

circundantes de esta galaxia. Al igual que las galaxias antes mencionadas, NGC 2612 no presenta estudios previos de su sistema de CGs.

NGC 4546: esta galaxia de campo, vista *edge-on*, no posee estudios previos de su sistema de CGs. Norris & Kannappan (2011) utilizaron espectroscopía de ranura larga sobre esta galaxia, incluyendo también la enana ultra-compacta (UCD, por sus siglas en inglés) presente entre los CGs de la misma. Kuntschner et al. (2010) obtienen mediante el ajuste de SSP sobre la luz difusa de NGC 4546, una edad de $11.7_{-1.0}^{+1.1} \times 10^9$ años, una metalicidad $[Z/H] = -0.13 \pm 0.02$ dex con gradiente negativo, y $[\alpha/Fe] = 0.27 \pm 0.04$ dex. Por su parte, los valores de edad, metalicidad y abundancia estimados por Norris et al. (2015) para la UCD fueron $3.99_{-0.75}^{+0.93} \times 10^9$ años, $[Z/H] = 0.18 \pm 0.06$ dex y $[\alpha/Fe] = 0.05 \pm 0.05$ dex, respectivamente. El valor de este último parámetro implica un período prolongado de formación, distinto a lo observado para los CGs típicos, los cuales tienen comúnmente un valor $[\alpha/Fe]$ supersolar (Puzia et al. 2005; Norris et al. 2006). Diferentes estudios espectroscópicos (Galletta 1987; Bettoni et al. 1991), revelan la presencia de gas ionizado rotando en la misma dirección que la UCD, pero en sentido opuesto y ligeramente fuera del plano relativo al disco estelar.

NGC 3414: definida como una S0 peculiar, es la galaxia central del grupo LGG 227 (García, 1993). La Figura 2.1 muestra, de hecho, dos de sus compañeras de grupo más próximas. La apariencia que presenta NGC 3414 ha dado diversas interpretaciones acerca de su naturaleza. Whitmore et al. (1990) sugirieron que se trataba de una galaxia vista *edge-on* con un gran anillo polar, mientras que Baggett et al. (1998) y Chitre & Jog (2002) la consideraban como una galaxia casi *face-on* con una prominente barra. Hu (2009) obtuvo para la dispersión de velocidades efectiva un valor de $\sigma_0 = 205 \pm 10$ km s⁻¹, estimando una masa para el agujero negro central de $M_{AN} = 2.4 \pm 0.3 \times 10^8 M_{\odot}$. La metalicidad estelar en el disco de NGC 3414, obtenida del estudio de Sil'chenko et al. (2012), es muy baja $[Z/H] = -0.4$ a -0.7 , con edades a lo largo del bulbo y disco de $\sim 12 \times 10^9$ años. Dichos valores fueron obtenidos por estos autores en base a los índices de Lick y modelos SSP. Por su parte, los valores de metalicidad obtenidos para el bulbo de NGC 3414 resultaron en $[Z/H] = +0.0$ y $[Mg/Fe] = +0.25$ dex. La región central del sistema de CGs de esta galaxia fue estudiado por Kundu & Whitmore (2001) utilizando el instrumento *Wide Field and Planetary Camera 2* (WFPC2) del telescopio espacial Hubble en los filtros F555W y F814W, los cuales fueron transformados al sistema *V* de Johnson e *I* de Cousins, respectivamente. En el mencionado trabajo, los autores obtienen en el rango de color $0.5 < (V - I) < 1.5$ un total de 117 candidatos a CGs, con un color medio de $\langle V - I \rangle = 1.09 \pm 0.02$ mag, sin evidencia de bimodalidad en la distribución de color. La población total de CGs estimada para el campo WFPC2 fue de 397, lo que corresponde a una frecuencia específica local de $S_{N(\text{local})} = 1.6 \pm 0.6$ (valor obtenido a partir de los objetos detectados dentro del campo de visión del HST). La magnitud de *turnover* en los filtros *V* e *I* para la función de luminosidad (ver Capítulo

11), obtenidos mediante el ajuste de una función gaussiana, fue de $m_V^0 = 24.85 \pm 0.53$ y $m_I^0 = 23.89 \pm 0.64$ mag, respectivamente. Las observaciones en rayos X de Chandra muestran que existe una fuente puntual que coincide con el núcleo de NGC 3414. Dicha fuente presenta una $L_X = 9.7 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$. Por su parte, los resultados de Condon et al. (2002) y Nagar et al. (2005) muestran que NGC 3414 tiene un núcleo activo.

NGC 5838: esta galaxia SA0 se encuentra ubicada en el grupo de galaxias NGC 5846 (Figura 2.1). Este último se compone de más de 83 miembros confirmados espectroscópicamente (Mahdavi et al., 2005), dominado principalmente por galaxias elípticas (E) y S0s. Sin embargo, NGC 5838 es la galaxia dominante de un subgrupo más pequeño que incluye nueve miembros. NGC 5838 presenta regiones nucleares cinemáticamente desacopladas, con dos anillos o discos de polvo y estrellas jóvenes (Peletier et al., 1999). Su bulbo contiene poblaciones estelares viejas con leve gradiente de color, excepto en la región más interna de 2 segundos de arco (Peletier & Balcells, 1997). Michard & Marchal (1994) sugieren que el disco exterior podría mostrar signos débiles de un patrón espiral. Mediante modelos SSP, McDermid et al. (2015) estiman edades, metalicidades y $[\alpha/\text{Fe}]$ dentro del radio efectivo obteniendo valores de $11.27 \pm 1.85 \times 10^9$ años, $[Z/H] = -0.02 \pm 0.05$ y $[\alpha/\text{Fe}] = 0.26 \pm 0.05$. O’Sullivan et al. (2001) obtienen una luminosidad en rayos-X para esta galaxia de $L_X = 1.04 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$. Al igual que en el caso de las galaxias antes mencionadas (excepto NGC 3414), NGC 5838 no presenta estudios de su sistema de CGs.

NGC 6861: catalogada como SA(s)0, se encuentra ubicada en el grupo Telescopium (AS0851), siendo una de las galaxias más brillantes junto con la galaxia elíptica NGC 6868. Observaciones realizadas con el instrumento Chandra en rayos X, muestran que ambas galaxias se encuentran en interacción, sugiriendo la fusión de dos subgrupos (Machacek et al., 2010). Wegner et al. (2003) obtienen para esta galaxia una dispersión de velocidades central notablemente alta de $\sigma_0 \sim 414 \text{ km s}^{-1}$, infiriendo la presencia de un agujero negro supermasivo (Machacek et al., 2010). Rusli et al. (2013) han incluido esta galaxia en su muestra total de diez galaxias masivas. Estos autores encontraron que NGC 6861 (junto con NGC 4751, otra galaxia S0) presenta la rotación más rápida y la dispersión de velocidades más alta en su muestra de galaxias, confirmando la alta masa dinámica para su agujero negro ($M_{\text{AN}} = 2.2_{-2.4}^{+2.1} \times 10^9 M_\odot$). La región central del sistema de CGs de NGC 6861 fue estudiada previamente por Kundu & Whitmore (2001), quienes analizaron 29 galaxias S0 en las bandas V y I (mencionadas anteriormente para NGC 3414) utilizando la WFPC2 del telescopio espacial Hubble. En ese trabajo se plantea la posibilidad de existencia de bimodalidad en la distribución de color de los candidatos a CGs en el rango $0.5 < (V - I) < 1.5$ mag. Además, los autores estimaron una población total de CGs en el campo de WFPC2 de 1858 CGs, y la correspondiente frecuencia específica local de $S_{N(\text{local})} = 3.6 \pm 1.6$.

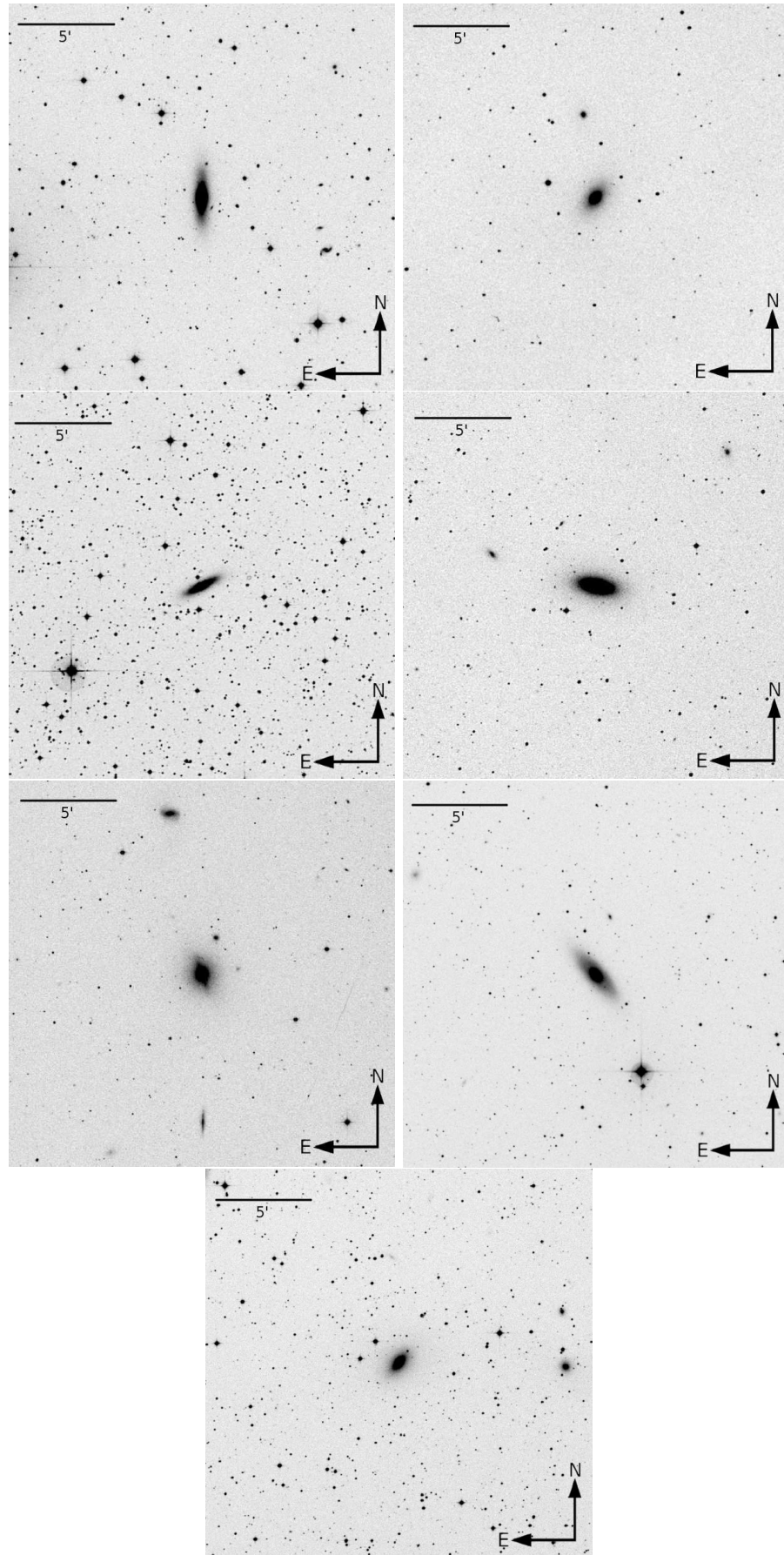


FIGURA 2.1: Imágenes DSS2 centradas en las galaxias de la muestra. Cada imagen tiene un campo de visión de 20 minutos de arco de lado, con su escala y orientación correspondiente. De izquierda a derecha y arriba hacia abajo, se muestran las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861.

Capítulo 3

Observaciones y reducción de los datos

3.1 Observaciones

Las observaciones correspondientes a las siete galaxias de la muestra, se llevaron a cabo en diferentes turnos de observación (GN-2009B-Q-39, GS-2010B-Q-2, PI: L. Bassino; GN-2011A-Q-23, GS-2013A-Q-26, PI: F. Faifer; GN-2013A-Q-36, GS-2014A-Q-30, PI: C. Escudero; GS-2011A-Q-13, PI: M. Norris) entre los años 2009 y 2014 (ver Tabla 3.1). En todos ellos se utilizaron las cámaras Gemini Multi-Object Spectrographs (GMOS, por sus siglas en inglés, Hook et al. 2004), montadas en los telescopios de 8.1 metros de Gemini Norte (Mauna Kea, Hawaii) y Gemini Sur (Cerro Pachón, Chile), tanto en modo imagen como espectroscópico. De aquí en más denominaremos a dichas cámaras ubicadas en Gemini Norte y Sur como, GMOS-N y GMOS-S, respectivamente.

El campo de visión de estos instrumentos es de aproximadamente 5.5×5.5 minutos de arco, consistiendo de tres detectores CCDs de 2048×4608 píxeles. Los mismos conforman un arreglo de 6144×4608 píxeles, con una separación de ~ 0.5 mm entre cada chip. A modo de ejemplo, en la Figura 3.1 se muestra una imagen tomada por GMOS-N, donde se aprecia la geometría en forma de octágono irregular que presenta el campo de visión en modo imagen. Sobre la misma también se visualiza el sensor de frente de onda (OIFWS, por sus siglas en inglés), el cual se sitúa sobre una estrella brillante en el campo de la imagen a fin no solo de compensar el movimiento de la imagen debido a factores como el viento, errores de seguimiento, cambios de temperatura, flexión, etc, sino también el de proveer información al sistema de óptica activa para mantener en enfoque al instrumento durante las exposiciones.

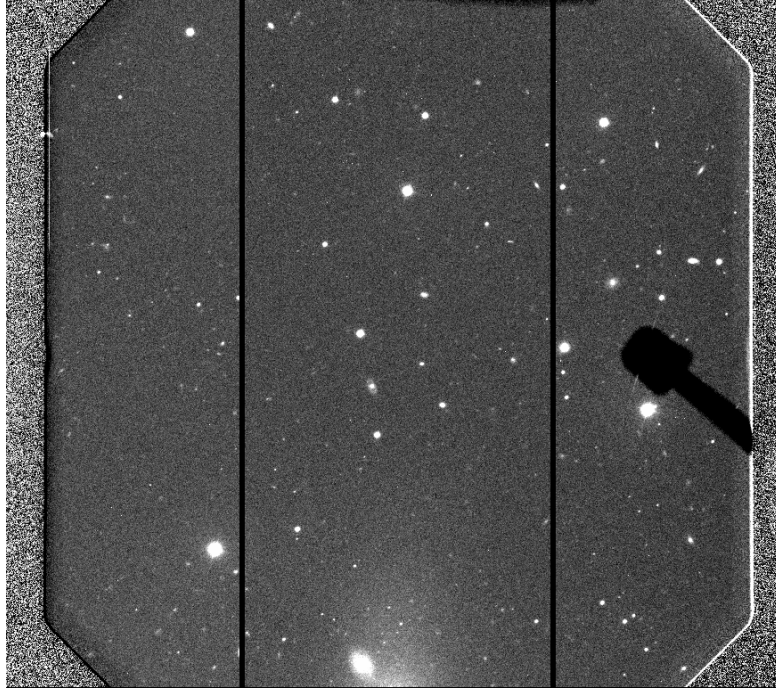


FIGURA 3.1: Imagen GMOS-N correspondiente a un campo aledaño a la galaxia NGC 2549. Se aprecia la forma de octágono irregular que posee el campo de visión, la separación entre los CCDs (*gaps*) y la posición del sensor de frente de onda (OIWFS) sobre una determinada estrella.

Los datos utilizados en esta Tesis fueron obtenidos en condiciones fotométricas empleando un *binning* de 2×2 , lo cual produce una escala de 0.146 segundos de arco por píxel. Todas las observaciones en modo imagen fueron adquiridas a través de los filtros g' , r' e i' del sistema fotométrico de *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS, por sus siglas en inglés; Fukugita et al. 1996). En el caso de NGC 4546, además, se obtuvieron imágenes a través del filtro z' del IR cercano, de manera de abarcar un rango mayor en longitud de onda, como así también espectros de objetos presentes en los alrededores de esta galaxia (ver Capítulo 14). En la Tabla 3.1 se presenta el número de exposiciones individuales, los tiempos de integración, así como el valor de *seeing* obtenido para las imágenes finales ya combinadas.

Es importante destacar el hecho de que las observaciones efectuadas por GMOS-N antes de octubre de 2011, se realizaron utilizando los detectores originales EEV. Luego de esa fecha, dichos CCDs fueron reemplazados por los dispositivos e2v DD los cuales comparten características similares a los anteriores, pero mejoran la sensibilidad en la región azul y roja del espectro visible, además de reducir notablemente el *fringing*. Por tal motivo, las calibraciones al sistema estándar de uno y otro conjunto de CCDs serán distintas, principalmente debido a diferencias en la eficiencia cuántica presentadas entre ellos. En el caso de GMOS-S, los detectores EEV fueron retirados en mayo de 2014, reemplazándolos por los detectores Hamamatsu¹. Sin embargo, los datos GMOS-S utilizados en esta Tesis

¹<https://www.gemini.edu/sciops/instruments/gmos/imaging/detector-array?q=node/11395>

Galaxia	Gemini ID	Campo	$t_{\text{exp.}}(\text{s})$				FWHM ($''$)			
			g'	r'	i'	z'	g'	r'	i'	z'
(1)	(2)	(3)	(4)				(5)			
NGC 2549	GN-2009B-Q-39	1	4x180	4x120	4x120		0.73	0.72	0.67	
		2	4x180	4x120	4x120		0.61	0.47	0.62	
		3	4x180	4x120	4x120		0.52	0.53	0.48	
		4	4x180	4x120	4x120		0.52	0.47	0.46	
NGC 2880	GN-2009B-Q-39	1	8x200	8x100	8x100		0.50	0.47	0.46	
		2	4x400	4x200	4x200		0.81	0.81	0.87	
		3	4x400	4x200	4x200		0.65	0.56	0.51	
NGC 2612	GS-2010B-Q-2	1	4x450	4x200	4x250		0.73	0.71	0.71	
NGC 4546	GS-2011A-Q-13	1	5x100	5x100	5x100	5x290	0.71	0.70	0.59	0.58
	GS-2014A-Q-30	2	5x100	5x100	5x100	5x290	0.67	0.59	0.51	0.46
		3	5x100	5x100	5x100	5x290	0.67	0.49	0.57	0.57
NGC 3414	GN-2013A-Q-36	1	4x420	4x220	4x220		0.68	0.73	0.71	
Campo comp.		1	4x420	4x220	4x220		0.71	0.57	0.53	
NGC 5838	GN-2011A-Q-23	1	4x460	4x200	4x200		0.75	0.65	0.69	
		2	4x460	4x200	4x200		0.72	0.68	0.67	
		3	4x460	4x200	4x200		0.69	0.67	0.61	
NGC 6861	GS-2010B-Q-2	1	4x700	4x350	4x400		0.57	0.80	0.77	
		2	4x700	4x350	4x400		0.62	0.48	0.43	
		3	4x700	4x350	5x400		0.88	0.75	0.82	
Campo comp	GS-2011A-Q-81	1	24x180	24x120	24x90		0.79	0.71	0.68	

TABLA 3.1: (1): Galaxias estudiadas. (2): Número de programa asignado por el Observatorio Gemini, correspondiente al año y semestre en el que fueron adquiridas las observaciones. (3): Designación de los campos observados. (4): Número de observaciones y tiempo de exposición en cada una de ellas. (5): Valor de FWHM promedio en segundos de arco luego de la combinación de las imágenes individuales.

fueron tomados con anterioridad a dicha fecha.

Las exposiciones en cada filtro para las diferentes galaxias fueron realizadas considerando pequeños desplazamientos espaciales entre sí (~ 6 segundos de arco). El objetivo de ello fue el de evitar pérdidas de información por los *gaps* entre los CCDs, limpiar los píxeles y columnas malas en los CCDs, así como también el de eliminar de rayos cósmicos durante el proceso de reducción de los datos.

En la Figura 3.2 se muestra la disposición y orientación de los campos observados para cada galaxia. En cada caso se intentó obtener imágenes de un número de campos tal que permitiera lograr un buen muestreo del sistema de CGs de las diferentes galaxias, junto con un campo de comparación aledaño que nos permitiera estimar la contaminación por estrellas de campo y objetos no resueltos de fondo. Sin embargo, el tiempo de telescopio finalmente obtenido para los distintos programas observacionales propuestos, no permitió concretar dicho objetivo en varios de los casos. Por ello, como indica la Tabla 3.1, para NGC 2612 y NGC 3414 sólo se consiguió observar un campo centrado en cada galaxia, y únicamente para esta última se pudo observar un campo de comparación.

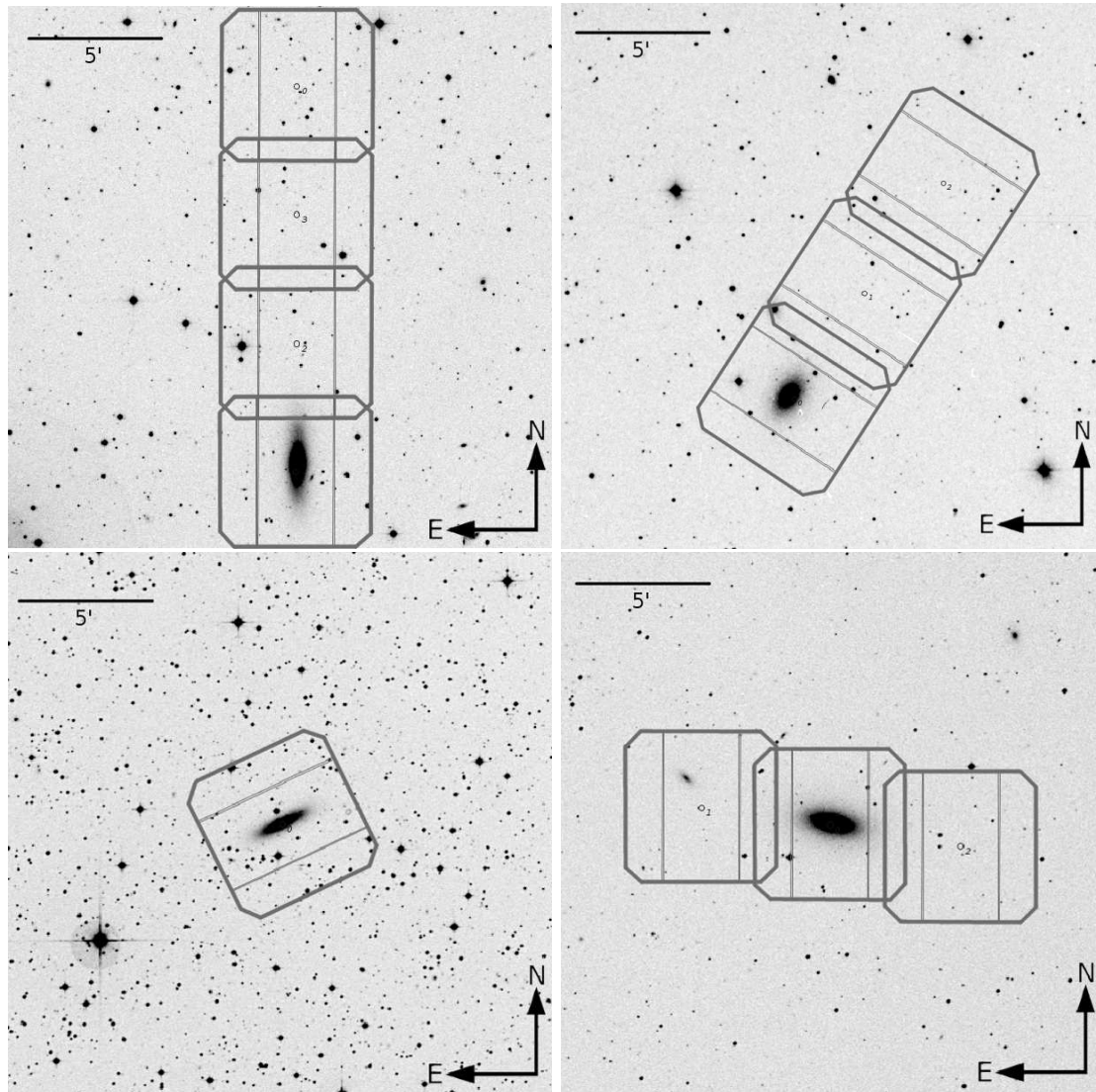


FIGURA 3.2: Orientación de los campos GMOS observados. De izquierda a derecha y arriba hacia abajo, se muestran las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861.

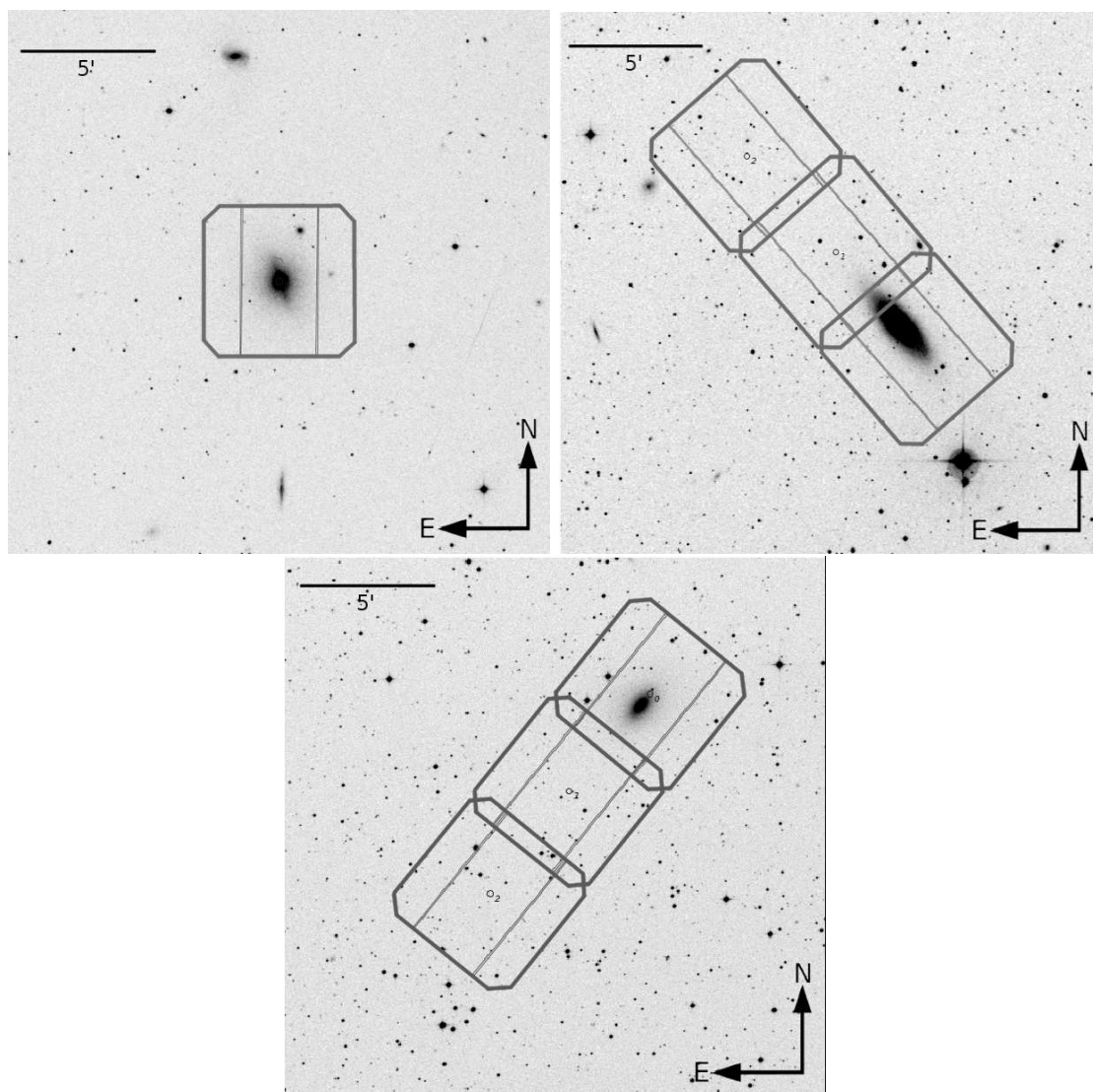


FIGURA 3.2: Continuación.

3.2 Reducción de los datos

El proceso de reducción de las observaciones de ciencia fue similar en los diferentes casos, llevándose a cabo mediante rutinas específicas Gemini/GMOS dentro de IRAF² (versión V2.15), tales como GPREPARE, GBIAS, GIFLAT, GIREDUCE, GMOSAIC, GIFRINGS, GIRMFRINGS, e IMCOADD.

Como punto de partida, fue necesaria la adquisición de imágenes bias y de campo plano (*flat-fields*), para eliminar cualquier sesgo, “artefacto” y/o no uniformidad píxel a píxel presente en cada una de las imágenes. Las mismas se obtuvieron del *Gemini Science Archive* (GSA, por sus siglas en inglés), las cuales forman parte de las *baseline calibrations* tomadas por el observatorio. Para cada conjunto de observaciones, se construyó un bias maestro mediante la combinación de aproximadamente cincuenta imágenes, obtenidas en períodos de un mes alrededor de las fechas de nuestras imágenes de ciencia. La estabilidad en el tiempo presentada por los bias, incluso a lo largo de semanas, permite realizar la combinación del número antes mencionado de imágenes, utilizando para ello la tarea GBIAS.

En el caso de los *flat-fields*, se buscó que los mismos hayan sido observados durante el crepúsculo o el amanecer de las noches en que se tomaron las imágenes de ciencia. Sin embargo, a diferencia de los bias, los *flat-fields* suelen mostrar estructuras que varían apreciablemente en función del tiempo. Por ello, fue necesario realizar diferentes pruebas hasta lograr una corrección aceptable en esta etapa. La combinación de este tipo de imágenes se realizó mediante la tarea GIFLAT en cada uno de los filtros.

Una vez contruidos los bias maestros, así como los *flat-fields* de cada filtro y para cada conjunto de imágenes de ciencia, se utilizó la tarea GIREDUCE sobre estas últimas. La misma es la encargada de realizar la sustracción del nivel de *overscan*, el bias y corregir por *flat* los datos de ciencia, en ese orden.

Dentro de esta etapa de la reducción, una característica que presentaban las imágenes de ciencia en los filtros i' y z' , era el efecto denominado *fringing*, debido al resultado de interferencia en un determinado rango de longitud de onda en los CCDs. En el panel izquierdo de la Figura 3.3, se muestra una imagen de ciencia obtenida con el detector GMOS-S, donde se observa el mencionado efecto. La corrección del patrón de *fringing* fue realizada solo en las imágenes obtenidas con GMOS-S, debido a que en la cámara GMOS-N el efecto es despreciable. En esta última, la intensidad de *fringing* en imágenes en la banda i' , corresponde a $\pm 0.7\%$ y $\pm 0.15\%$ del nivel de señal del *background* para los detectores EEV y e2vDD, respectivamente. Para restar este efecto en los datos

²IRAF es distribuido por National Optical Astronomical Observatories, el cual es operado por la Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., bajo un acuerdo cooperativo con la National Science Foundation

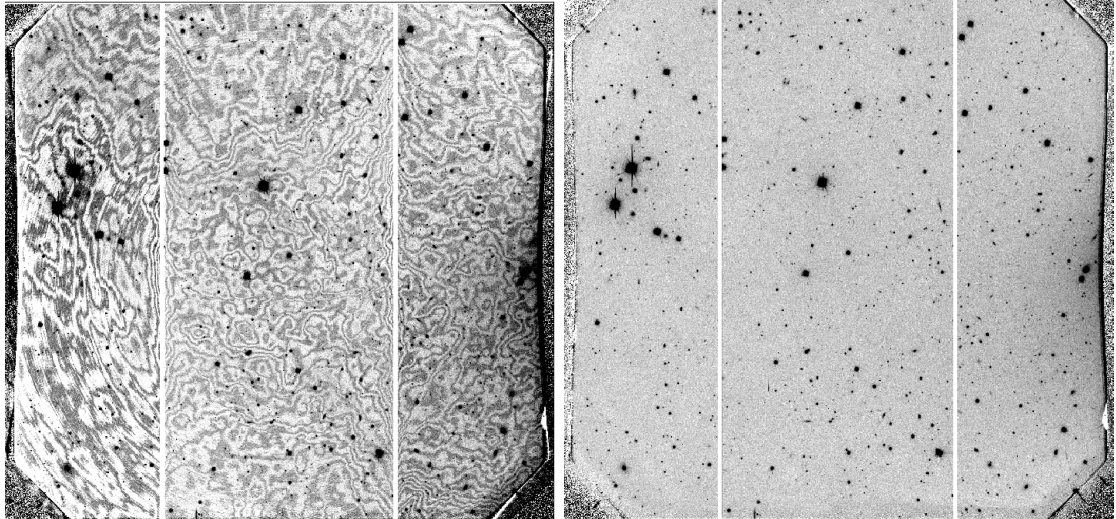


FIGURA 3.3: Panel izquierdo: patrón de *fringing* observado sobre la imagen cruda en la banda i' de GMOS-S. Panel derecho: Misma imagen con el efecto de *fringing* corregido.

de ciencia, se utilizaron las imágenes de calibración *blank sky*. Este tipo de imágenes, con tiempos de exposición de 300 segundos, son obtenidas por el observatorio en cada semestre y se encuentran disponibles en el GSA. Se descargaron alrededor de cinco imágenes *blank sky*, con fechas cercanas a los datos de ciencia, las cuales fueron reducidas de acuerdo al procedimiento mencionado anteriormente. La combinación de estos datos se realizó mediante la tarea GFRINGE, la cual permite borrar los objetos en las imágenes individuales, y recuperar el patrón de *fringing* presente en ellas. El resultado final de dicha tarea es entonces una imagen promedio donde sólo está presente el mencionado patrón. La misma es luego utilizada para restar el *fringing* de las imágenes de ciencia ya reducidas. Este último paso en la corrección de los datos es realizado utilizando la tarea GIRMFRINGE de IRAF. El resultado de la corrección se aprecia en el panel derecho de la Figura 3.3.

Una vez que los datos fueron corregidos por los efectos antes mencionados, se procedió a combinar las imágenes de ciencia correspondientes a un mismo campo y filtro, utilizando la tarea IMCOADD del paquete GEMTOOLS de IRAF. En este paso, y antes de aplicar dicha tarea, se mejoraron las máscaras de píxeles malos que vienen incluidas en el paquete Gemini-GMOS de IRAF, agregando a las mismas regiones defectuosas que aparecen a lo largo del tiempo en los detectores. La tarea IMCOADD realiza una búsqueda automática de objetos y obtiene las transformaciones geométricas (desplazamiento y rotación) entre las distintas exposiciones individuales en un mismo filtro de cada campo. Mediante dichas transformaciones, la tarea registra las distintas imágenes. Luego aplica las correspondientes máscaras de píxeles malos, y combina las imágenes mediante un promedio identificando en el mismo paso los rayos cósmicos presentes en las mismas. Un aspecto importante de esta tarea es que la misma realiza un control de la escala fotométrica de cada imagen (realizando fotometría de apertura sobre los

objetos detectados), y permite aplicar correcciones de flujo que hacen posible combinar imágenes tomadas en momentos distintos o bajo condiciones de observación ligeramente distintas.

Como última etapa, y debido a la existencia de pequeños errores de apuntamiento entre las imágenes de un mismo campo en los diferentes filtros, se procedió a alinear las mismas. Para ello, se utilizaron las tareas GEOMAP y GEOTRAN del paquete IMMATCH de IRAF. La primera fue utilizada para encontrar la transformación geométrica (polinomio de segundo grado) entre las imágenes en los distintos filtros (utilizando una lista de objetos puntuales previamente confeccionada). La segunda tarea es la encargada de aplicar sobre las imágenes dicha transformación.

Este proceso de reducción brinda imágenes resultantes “limpias” de los defectos instrumentales y aptas para realizar la fotometría necesaria en este estudio (ver Tesis de Licenciatura de Escudero 2011). Es de destacar que la calidad de las imágenes finales poseen una excelente resolución espacial, teniendo en todos los casos $\text{FWHM} < 0.9$ segundos de arco (ver Tabla 3.1).

Capítulo 4

Clasificación de objetos y fotometría

4.1 Clasificación de objetos

La construcción de catálogos fotométricos precisos implica considerar diversos aspectos. Entre los principales se encuentran el de detectar la mayor cantidad posible de fuentes, obtener estimaciones precisas y confiables de posiciones, magnitudes, colores, y de diversos parámetros geométricos. Además de ello, si el objetivo es obtener una muestra de objetos no resueltos, lo más limpia posible de objetos resueltos o marginalmente resueltos, surge otro aspecto fundamental y es que se requiere una correcta clasificación entre objetos puntuales y extendidos. Todo esto se agrava más aún en las cercanías del centro de las galaxias, donde el brillo de las mismas dificulta la detección.

Con el objetivo de lograr una mejor detección, clasificación y posterior fotometría de los objetos de interés (en nuestro caso, los candidatos a CGs), ubicados en las regiones antes mencionadas, es necesario remover el brillo de las galaxias en las imágenes. Esto se logró mediante un procedimiento que combina las características de diferentes software tales como, Source Extractor (SExtractor; Bertin & Arnouts 1996) y Point Spread Function Extractor (PSFEx; Bertin 2013), en conjunto con las tareas de filtrado de IRAF.

Explicaremos brevemente cada uno de los software y el método implementado sobre los datos de ciencia.

SExtractor fue diseñado para construir catálogos fotométricos de una gran cantidad de fuentes, tanto puntuales como extendidas, de manera extremadamente rápida y con poca intervención del usuario. Sin embargo, es conocido que la calidad de la fotometría de objetos puntuales es menor que la brindada por DAOPHOT II (Stetson, 1987; Annunziatella et al., 2013). En un intento por superar esta “falencia” de SExtractor, en los últimos

años se ha comenzado a implementar el modelado de la “*point spread function*” (PSF) mediante la herramienta PSFEx, la cual intenta combinar la rapidez de SExtractor y la precisión del ajuste de PSF. Un análisis comparativo entre los software DAOPHOT II y PSFEx puede verse en el Apéndice A. Allí se observa que si bien las mediciones fotométricas de PSFEx resultan aceptables al compararlas con los valores obtenidos por DAOPHOT, este último software continúa siendo más confiable, y es el que se utiliza en esta Tesis.

PSFEx presenta una utilidad adicional, y es que permite construir más rápidamente un modelo PSF y, a partir del mismo, generar un nuevo parámetro de clasificación, denominado *spread_model*, el cual puede complementarse con el ya conocido índice de estelaridad (*class_star*) de SExtractor. Recordemos que el rango de valores producidos por *class_star* varía entre 0 y 1 (panel superior en Figura 4.1), asignando 0 a objetos que el programa considera resueltos, y 1 a aquellos no resueltos (dicha clasificación es realizada mediante una red neuronal). En el caso de *spread_model*, el mismo realiza una comparación entre el modelo PSF local y el mismo modelo convolucionado con un disco exponencial de escala FWHM/16. En este caso los objetos catalogados como no resueltos se ubican alrededor del valor 0. A modo de ejemplo, en el panel inferior de la Figura 4.1 se muestran conjuntamente los valores asignados tanto por *class_star* como por *spread_model* para un campo centrado en la galaxia NGC 3414 (ver Apéndice A).

- El procedimiento utilizado aquí para detectar la mayor cantidad posible de fuentes en los campo de las galaxias mencionadas en la muestra, se inicia con SExtractor. Se realiza una estimación del nivel de cielo, calculando la mediana dentro de pequeñas regiones (~ 28 pix.), las cuales forman una “malla” sobre toda la imagen. También se detectan las fuentes cuya señal se encuentre por encima de un cierto valor umbral para poder separarlas de fuentes espurias. En esta etapa se genera una imagen con los objetos detectados (panel superior derecho en Figura 4.2), la cual es utilizada para restarla a la imagen original y quedarnos no solamente con la emisión extendida de objetos resueltos en el campo de visión, sino también poder detectar la presencia de fuentes que no fueron encontradas en esta primera ejecución.
- Esta imagen resultante es posteriormente suavizada empleando la tarea FMEDIAN de IRAF, la cual asigna al píxel central de una caja rectangular que recorre toda la imagen, la mediana de la distribución de valores de los píxeles dentro de la mencionada caja. En esta fase, se empleó una caja de 101×101 píxeles, para obtener una buena representación de la luz difusa presente en la imagen (panel inferior izquierdo en Figura 4.2). Posteriormente, la imagen filtrada es utilizada

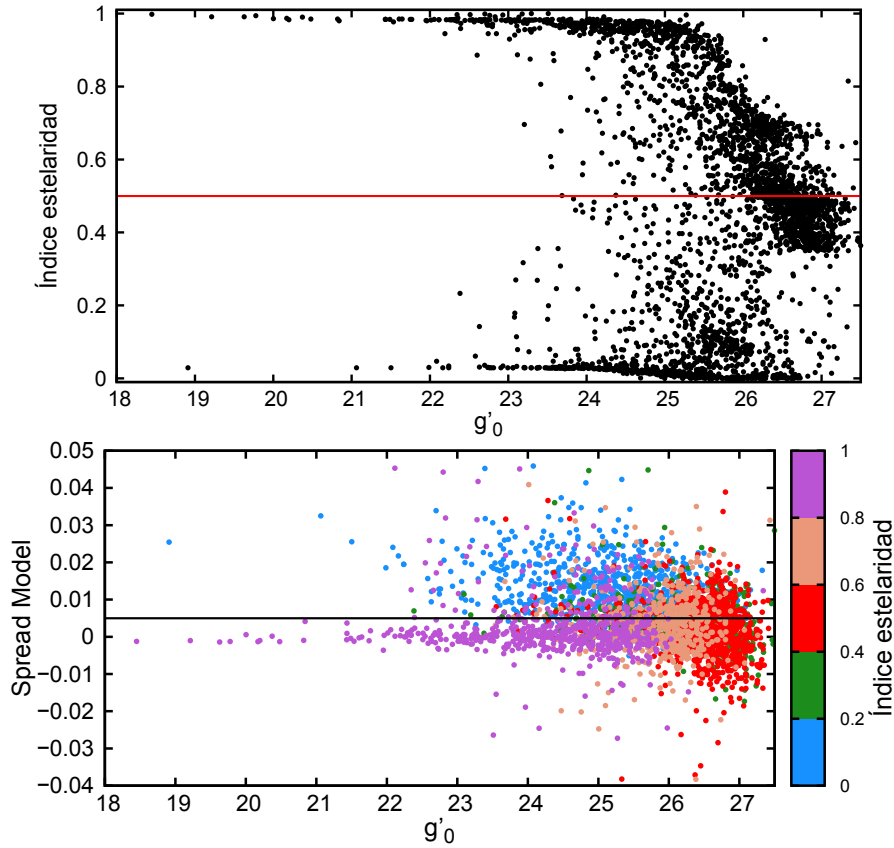


FIGURA 4.1: Panel superior: valores obtenidos para el índice *class_star* en función de la magnitud correspondiente a los objetos detectados en el campo de NGC 3414. Panel inferior: valores resultantes para el índice *spread_model* en función de la magnitud para el mismo campo. Las líneas horizontales roja y negra en ambas figuras indican el límite considerado para separar entre objetos puntuales y extendidos.

para restarla de la imagen original. Este proceso deja algunos residuos del modelado, sobre todo en la región interna de las galaxias (panel inferior derecho en Figura 4.2).

- Nuevamente, se inicia el proceso ejecutando SExtractor sobre esta última imagen generada, pero utilizando en esta oportunidad un filtrado más pequeño de 51×51 píxeles para mejorar el modelado en regiones que presentan mayor gradiente. De esta manera, se detectan nuevos objetos los cuales no habían sido encontrados previamente, y se eliminan posibles halos débiles alrededor de objetos cercanos al centro de las galaxias.
- Obtenemos de esta forma para cada filtro, un catálogo que contiene todas las fuentes detectadas en ambas corridas, y una imagen final con la luz de la galaxia restada y valor de cielo uniforme, la cual será utilizada durante el resto de la fotometría. Es necesario tener en cuenta que el proceso antes explicado resta tanto la componente difusa de cada galaxia, así como también el nivel medio de cielo en cada imagen. Dado que la tarea DAOPHOT (la cual será usada para la

fotometría), realiza estimaciones de errores y de calidad de los ajustes de la PSF en base al ruido esperado sobre cada imagen, resulta necesario restituir dicho valor de cielo a cada imagen. Para ello, se utilizó la tarea IMCALC.

En cada etapa de este proceso, SExtractor actúa simultáneamente con PSFEx, ajustando a cada objeto medido el modelo PSF creado por este último y asignando el correspondiente valor de *spread_model*. El proceso de modelado de la PSF utilizado por PSFEx se detalla en el Apéndice A.

Dado que los CGs típicos presentan radios efectivos (R_{ef}) de algunos parsec, es esperable que no se encuentren resueltos en las imágenes GMOS, dadas las distancias a las cuales se ubican las galaxias incluidas en la muestra (Tabla 2.1). Una excepción a esto pueden ser las UCDs (Drinkwater et al. 2000; Mieske et al. 2004), cuyos tamaños pueden alcanzar varias decenas de parsec ($10 < R_{\text{ef}} < 100$ pc). Incluso, también podrían resolverse los recientemente descubiertos CGs extendidos y difusos (*faint fuzzies*, por su nombre en inglés), los cuales presenta tamaños $7 < R_{\text{ef}} < 15$ pc, ubicándose principalmente en galaxias S0 (Larsen & Brodie 2000; Brodie et al. 2011; Chies-Santos et al. 2013). Estos últimos presentan colores y luminosidades similares a CGs, sin embargo serían consistentes con cúmulos estelares jóvenes (Forbes et al., 2014). Luego de experimentar con distintos valores de corte para los parámetros de clasificación de SExtractor y PSFEx (Escudero et al., 2015b), adoptamos como criterio de separación entre los objetos puntuales y extendidos, $class_star > 0.5$ y $spread_model < 0.005$, respectivamente (ver Figura 4.1).

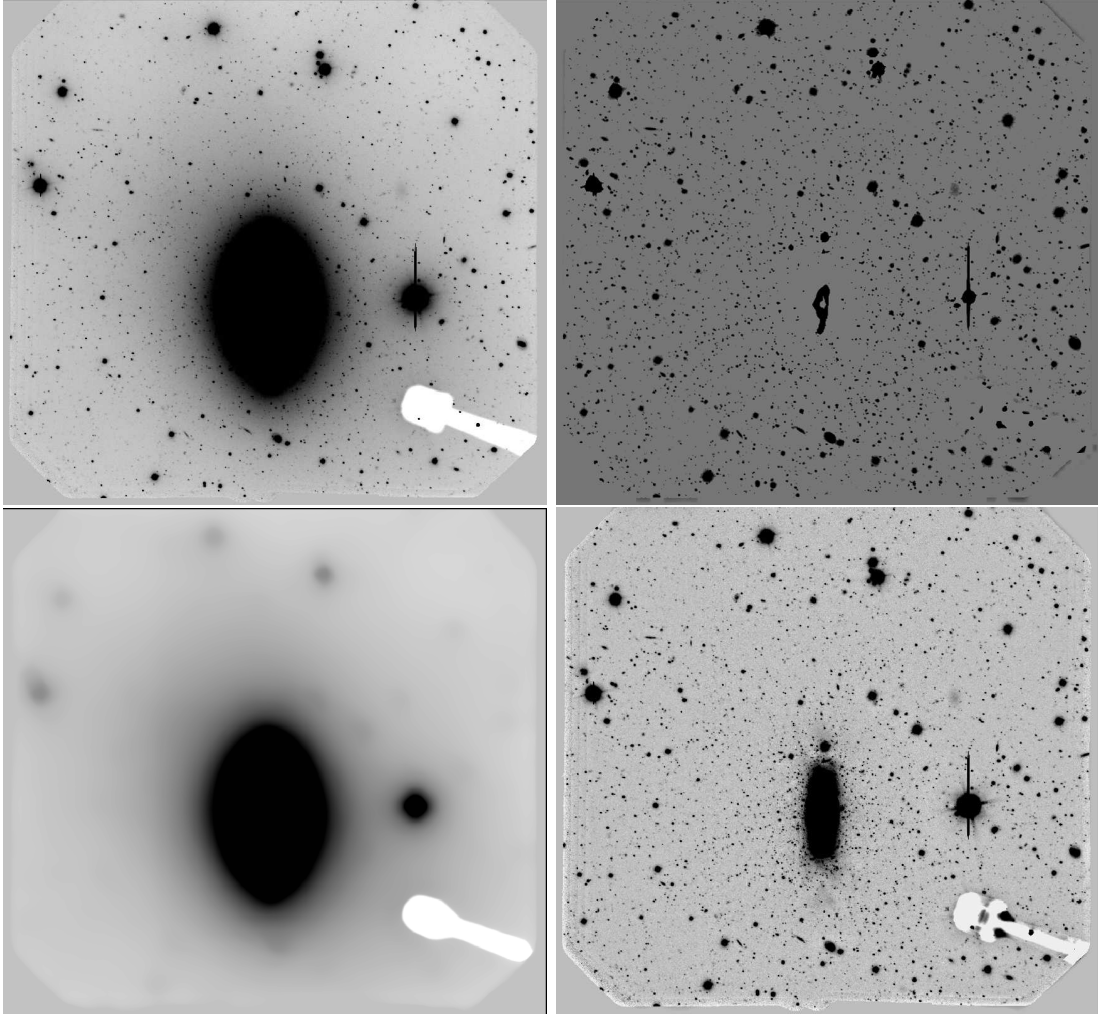


FIGURA 4.2: Panel superior izquierdo: imagen original reducida de NGC 6861 antes de aplicar SExtractor. Panel superior derecho: imagen de salida de SExtractor, la cual contiene los objetos detectados en la primer corrida. Panel inferior izquierdo: imagen filtrada utilizando una caja de 101×101 píxeles. Panel inferior derecho: imagen resultante obtenida luego de la primer corrida de SExtractor, donde se observa la galaxia con parte de su luz restada.

4.2 Fotometría

Luego de realizada la detección de objetos, de acuerdo a los lineamientos mencionados en la Sección 4.1, se procedió a realizar fotometría de apertura utilizando la tarea PHOT del paquete DIGIPHOT.DAOPHOT dentro de IRAF. La lista inicial de coordenadas con los objetos detectados, necesaria para dicha tarea, se correspondió principalmente a los filtros g' o r' , dado que los mismos presentaban una mejor relación señal-ruido (S/N) que las imágenes i' y z' (este último, en el caso de NGC 4546). El objetivo de dicha fotometría es la de obtener valores iniciales de magnitudes instrumentales para cada objeto detectado, las cuales son utilizadas posteriormente por DAOPHOT para la obtención de las magnitudes de ajuste de PSF. El valor de FWHM obtenido para cada imagen de ciencia fue utilizado como valor inicial del radio de apertura en la tarea PHOT. Esto,

además, fija la escala fotométrica de las magnitudes PSF a aquella de la fotometría de apertura antes mencionada.

Para la construcción de un modelo PSF, es necesario utilizar una lista inicial de fuentes no resueltas, brillantes y, si es posible, que se encuentren aisladas en la imagen. Además, debido a la variabilidad espacial que puede presentar la PSF, resulta necesario que dichas fuentes se encuentren distribuidas uniformemente sobre el campo. Como se mencionó anteriormente, utilizamos el paquete DAOPHOT dentro de IRAF para la obtención de los modelos PSF.

Aprovechando los catálogos obtenidos anteriormente por SExtractor en cada filtro, seleccionamos aproximadamente cincuenta fuentes brillantes cuyo índice de estelaridad fuese alto ($class_star > 0.9$), e intentando que las mismas cumplan con los requisitos antes mencionados. Mediante la tarea PSF, ajustamos a la distribución de luz de los objetos un modelo Moffat 25 de segundo orden dado por:

$$Moffat_{25} = \frac{A}{\left(1 + \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x y p_3\right)^{2.5}}, \quad (4.1)$$

siendo A una amplitud o constante de normalización y p_n los parámetros ajustados en el proceso de armado del modelo PSF. Dicho modelo permite obtener errores más bajos que los resultantes al emplear otras variantes analíticas incluidas en la tarea (como el modelo gaussiano y el Moffat 15). Se obtuvieron así los respectivos modelos PSF para cada campo de ciencia y para cada filtro.

Luego, se ajustaron los modelos PSF correspondientes a cada uno de los objetos detectados en cada imagen (resueltos y no resueltos). Ello se llevó a cabo mediante la tarea ALLSTAR. La lista de coordenadas de entrada y de magnitudes iniciales para dicha tarea es, en cada caso, aquella que fue oportunamente producida por la tarea PHOT.

La fotometría de ajuste de PSF obtenida en cada caso, posee una escala fotométrica generada a partir de los objetos más brillantes que fueron seleccionados para realizar los respectivos modelos PSF. Como se mencionó anteriormente, los valores iniciales de magnitudes de todas las fuentes detectadas, se obtuvieron considerando una apertura de radio similar al FWHM en cada imagen. Por ello, resulta necesario realizar correcciones que nos permitan incluir la luz que ha quedado fuera de la apertura considerada en cada caso. Obviamente, esto es posible de realizar únicamente para los objetos no resueltos. Por ello, si bien la salida de ALLSTAR incluye magnitudes para todos los objetos previamente detectados en cada campo, estas sólo serán realistas para los objetos puntuales. Para obtener la corrección de apertura correspondiente, se utiliza nuevamente la tarea PHOT sobre objetos aislados, puntuales y brillantes en el campo, utilizando una serie de aperturas. Las mismas deben escogerse tan grandes como se pueda, evitando incluir la luz de fuentes vecinas dentro de ellas. La información fotométrica obtenida en dichas

aperturas es utilizada posteriormente por la tarea MKAPFILE del paquete PHOTCAL de IRAF. La misma, utiliza modelos de curvas de crecimiento para obtener las correcciones buscadas, las cuales deben ser adicionadas luego a las magnitudes producidas por ALLSTAR.

Como se observa en la Fig. 3.2, varias de las galaxias de la muestra presentan más de un campo observado. Para combinar la fotometría de los distintos campos en cada galaxia, y unificarlas de manera de obtener un catálogo homogéneo y único para cada una de ellas, se utilizaron objetos en común ubicados en las regiones de superposición de los mismos. Se obtuvieron las diferencias en sus magnitudes, las cuales se deben principalmente a variaciones en las condiciones en que fueron realizadas las observaciones, correcciones durante el proceso de reducción, diferencias en los ajustes de PSF, etc. En todos los casos, tales diferencias resultaron pequeñas, no superando 0.07 mag. Las diferencias fotométricas halladas fueron luego aplicadas según cada caso.

Utilizando las posiciones de los mencionados objetos, medidos en las regiones de superposición de los distintos campos para cada galaxia, se determinaron las transformaciones geométricas necesarias para llevar a un mismo sistema de referencia a todos los objetos que componen cada catálogo. La aplicación de dichas transformaciones fue realizada mediante la tarea GEOXYTRAN de IRAF.

De esta manera se obtuvieron catálogos homogéneos y únicos para las respectivas galaxias, los cuales contienen las magnitudes instrumentales (con su correspondiente corrección de apertura) en cada filtro para todos los objetos medidos en cada campo, así como diversos parámetros como posiciones, valor del FWHM, índice de estelaridad y el índice *spread_model*.

Capítulo 5

Calibraciones fotométricas y experimentos de completitud

5.1 Puntos de cero medios

Con el objetivo de transformar las magnitudes instrumentales en magnitudes calibradas al sistema fotométrico de Sloan, se utilizaron campos de estrellas estándar observados durante las mismas noches que los campos de ciencia. En el caso de NGC 3414 y NGC 5838 se solicitaron “campos de estándares” en los respectivos programas de observación, mientras que para el resto de las galaxias se descargaron campos de estándares del GSA, los cuales forman parte de las *baseline calibrations* tomadas regularmente por el observatorio. En la Tabla 5.1 se listan los diferentes campos utilizados para cada una de las galaxias. El proceso de reducción de estos datos se realizó empleando los correspondientes bias e imágenes *flat-field* utilizados previamente en el proceso de reducción de los campos de ciencia de cada galaxia.

Las magnitudes integradas instrumentales de las estrellas estándar se obtuvieron utilizando la tarea PHOT. Dado que en la mayoría de los casos los campos no resultan muy poblados, se optó por utilizar una apertura lo suficientemente grande como para incluir prácticamente toda la luz de cada objeto. Esto, dado que el *seeing* en las imágenes es en todos los casos $\ll 1$ segundo de arco, se consiguió empleando aperturas del orden de 3 segundos. De este modo, no fue necesario aplicar corrección de apertura a dicha fotometría.

Recordemos que el campo de visión de GMOS es relativamente pequeño, por lo que los campos de estándares que se observan, rara vez incluyen más que unas pocas estrellas estándar. Por otro lado, tratándose de telescopios de 8 metros de diámetro, la mayoría de las estándares primarias saturan muy fácilmente los CCDs de GMOS. Razón por la

cual, se deben tomar exposiciones muy cortas. Esto lleva a que usualmente se tomen por lo menos dos exposiciones de cada campo, en cada filtro. Se intenta así minimizar el efecto que pueden producir las pequeñas diferencias en el tiempo que permanece abierto el obturador del CCD. Además de esto, usualmente no se cuenta con medidas de los valores de los coeficientes de extinción atmosféricos para cada noche de observación. Por ello, generalmente se utilizan los valores medios listados en la página web de GMOS.

En el caso de las observaciones obtenidas a través de GMOS-N, las estrellas estándar corresponden a la lista de campos de Landolt (1992), mientras que para GMOS-S, provienen de Smith et al. (2002, 2007). Es importante entonces recordar que, debido a que las primeras se encuentran referidas al sistema de Johnson-Kron-Cousin $UBVR_cI_c$, resulta necesario transformarlas al sistema de Sloan $u'g'r'i'z'$. Con tal fin, se optó por utilizar las relaciones empíricas de Smith et al. (2002), y no aquellas sintéticas sugeridas por Fukugita et al. (1996). Dichas relaciones vinculan ambos sistemas fotométricos, y permiten obtener magnitudes $u'g'r'i'z'$, partiendo de las correspondientes magnitudes $UBVR_cI_c$. Se ha optado aquí por utilizar las transformaciones de Smith et al. simplemente porque ellas son más modernas y se encuentran basadas en observaciones, mientras que aquellas de Fukugita et al. provienen de modelos. Luego, las transformaciones utilizadas fueron:

$$\begin{aligned} g' &= V + 0.54(B - V) - 0.07 \\ r' &= V - 0.44(B - V) + 0.12 \\ (r' - i') &= 1.00(R - I) - 0.21 \quad \text{para } R - I < 1.15. \end{aligned}$$

Las mismas se aplicaron a las magnitudes de catálogo correspondientes a las estrellas estándares de los campos utilizados para las galaxias NGC 2549 y NGC 2880 (ver Tabla 5.1).

Galaxia	Campos de Estándares	Ref.
NGC 2549	PG0918+029	[1]
NGC 2880	PG0942-029 / PG0918+029	[1]-[2]
NGC 2612	075944-595500	[2]
NGC 4546	E5-b	[2]
NGC 3414	DLS-1052-05	[2]
NGC 5838	SA-132-A / PG-1633	[2]
NGC 6861	0200000-300600 / 220100-300000 / 180000-600000	[2]
	E8-a / CDFS / 220000-595900 / 020020-600000	

TABLA 5.1: Campos de estándares utilizados en las diferentes galaxias. Referencia: [1] campos provenientes de la lista de Landolt (1992); [2] campos provenientes de la lista de Smith et al. (2002, 2007). En el caso de NGC 2880, se obtuvieron tanto campos de Landolt como de Smith et al.

Una vez medidas las estrellas estándar, el siguiente paso en el proceso de obtener las calibraciones al sistema estándar, fue el de determinar puntos de cero medios para cada

filtro, y para cada noche de observación. Esto es, en esta primera etapa se decidió ignorar cualquier término de color que pudiera existir entre las magnitudes instrumentales de GMOS y las calibradas al sistema de Sloan. La razón de ello es que, según lo expresado antes, no siempre se cuenta con un número adecuado de estrellas estándar por campo, o bien, estas no poseen un rango adecuado de colores que permita obtener de manera segura dichos términos. Por otro lado, en la página web de los instrumentos GMOS han sido publicados valores de dichos términos para GMOS-S, aunque los mismos se obtuvieron en base a observaciones de una única noche. Para el caso de GMOS-N, existe en la literatura un trabajo previo (Jørgensen, 2009) que analiza dichos términos. Sin embargo, este se basa en datos obtenidos en 2003 y 2004, lo cual significa que su aplicación a datos más modernos no es del todo segura.

Entonces, se procedió a aplicar las siguientes expresiones para obtener una primera estimación de los puntos de cero (de orden cero) para llevar las magnitudes instrumentales al sistema estándar AB de Sloan:

$$m_{\text{std}} = m_{\text{cero}} + m_{\text{inst}} - K_{\text{MK}}(X - 1) \quad (5.1)$$

$$m_{\text{std}} = m_{\text{cero}} + m_{\text{inst}} - K_{\text{CP}}(X - 1), \quad (5.2)$$

siendo m_{std} las magnitudes estándar, m_{cero} los puntos de cero fotométricos, m_{inst} las magnitudes instrumentales, K_{MK} y K_{CP} los coeficientes de extinción atmosférica media de Mauna Kea y Cerro Pachón, respectivamente (obtenidos de la página web del Observatorio Gemini¹), y X son las masas de aire de nuestras observaciones (ver Tabla 5.2).

Si bien ambos instrumentos GMOS-S y GMOS-N son similares, es esperable que las calibraciones y términos de color sean ligeramente distintos entre ellos. Esto se debe, principalmente, a diferencias en las eficiencias cuánticas de los detectores, y también a que los detectores de ambos instrumentos han sido modificados a lo largo de los años. Se aplicaron entonces las correcciones por extinción atmosférica a las magnitudes instrumentales de las estrellas estándar, y se obtuvieron valores medios de los puntos de cero pesados por los errores. En este proceso se consideraron únicamente aquellas estrellas estándar ubicadas dentro del rango usual de los colores de CGs (ver Sección 7.1). Esto fue realizado para cada campo de estándares y en cada filtro. Los valores obtenidos de los puntos de cero se listan en la Tabla 5.2. Los mismos se aplicaron luego tanto a la fotometría de nuestros campos de ciencia, como también a las magnitudes instrumentales de las estrellas estándar.

Como se mencionó anteriormente, los filtros $u'g'r'i'z'$ utilizados por los instrumentos GMOS, fueron diseñados para ser idénticos a los filtros del SDSS. Sin embargo, al

¹<http://www.gemini.edu/?q=node/10445>

Galaxia	Filtro	K_{CP}	K_{MK}	X	m_{cero}
NGC 2549	g'	-	0.14	1.56	27.92 ± 0.01
	r'	-	0.11	1.61	28.32 ± 0.01
	i'	-	0.10	1.50	28.22 ± 0.01
NGC 2880	g'	-	0.14	1.50	27.92 ± 0.01
	r'	-	0.11	1.43	28.33 ± 0.01
	i'	-	0.10	1.40	28.23 ± 0.01
NGC 2612	g'	0.18	-	1.28	28.31 ± 0.01
	r'	0.10	-	1.35	28.36 ± 0.01
	i'	0.08	-	1.45	27.96 ± 0.01
NGC 4546	g'	0.18	-	1.13	28.27 ± 0.01
	r'	0.10	-	1.12	28.36 ± 0.01
	i'	0.08	-	1.12	27.98 ± 0.02
	z'	0.05	-	1.11	26.84 ± 0.01
NGC 3414	g'	-	0.14	1.01	28.28 ± 0.01
	r'	-	0.11	1.03	28.37 ± 0.01
	i'	-	0.10	1.05	28.46 ± 0.01
NGC 5838	g'	-	0.14	1.10	27.81 ± 0.01
	r'	-	0.11	1.06	28.24 ± 0.01
	i'	-	0.10	1.05	28.15 ± 0.01
NGC 6861	g'	0.18	-	1.34	28.41 ± 0.02
	r'	0.10	-	1.25	28.44 ± 0.01
	i'	0.08	-	1.18	28.01 ± 0.01

TABLA 5.2: Calibraciones para llevar al sistema estándar. K_{CP} y K_{MK} : coeficientes de extinción atmosférico medio en Cerro Pachón y Mauna Kea, respectivamente. X : masa de aire de las observaciones. m_{cero} : valores de punto de cero obtenidos en cada ajuste.

comparar las curvas de transmisión para los filtros en ambos sistemas fotométricos, se observa que las mismas se encuentran levemente desplazadas entre sí (ver Figura 1 en Jørgensen 2009). Nuevamente, recordemos que las diferencias en las eficiencias cuánticas de los CCDs entre los dos sistemas, y entre los dos GMOS, juegan también un papel importante. Asimismo, debemos recordar que los espejos de los telescopios Gemini se encuentran recubiertos en plata. De esta manera, es esperable que existan términos de color no nulos para las transformaciones mencionadas anteriormente (Ecuaciones 5.1 y 5.2).

Entonces, con el objetivo de estimar los términos de color a partir de los campos de estándares, como primer paso se obtuvieron los residuos de punto de cero de las magnitudes correspondientes a cada estrella. Para ello se utilizó la expresión:

$$\Delta m_{cero} = m_{std} - [m_{inst} - K_{CP/MK}(X - 1) + m_{cero}] \quad (5.3)$$

donde m_{cero} es la magnitud de punto de cero medio adoptado para un determinado filtro y campo, calculada previamente (Tabla 5.2). Las Figuras 5.1-5.7 muestran Δm_{cero} en función de los colores estándar obtenidos para los campos de estándares de todas las galaxias. A partir de estos puntos de cero residuales, es posible obtener los términos de color CT empleando la muestra completa de estrellas medidas en los diferentes campos de

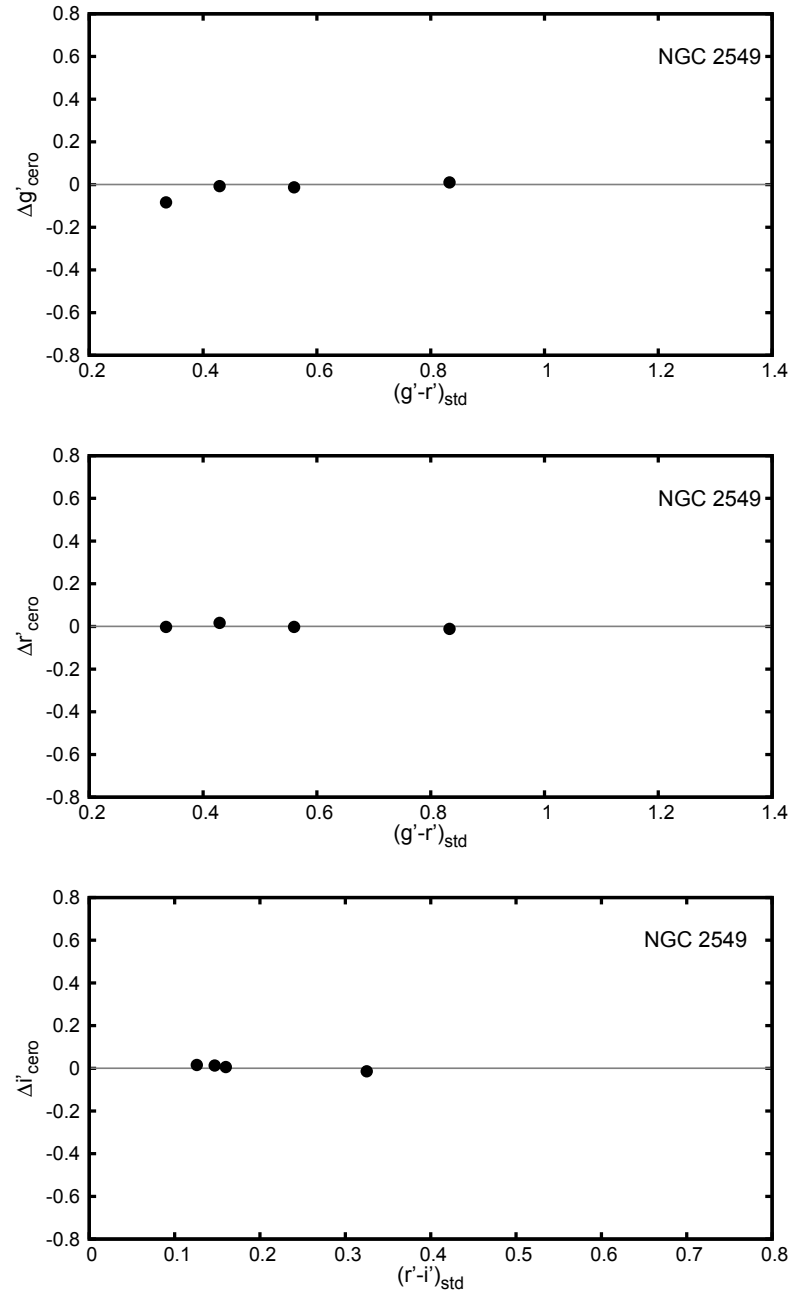


FIGURA 5.1: Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 2549. Las líneas grises indican el valor cero en Δm_{cero} .

estándares para una misma galaxia. Los diferentes análisis realizados sobre los términos de color para GMOS-S y GMOS-N se muestran en las siguientes secciones.

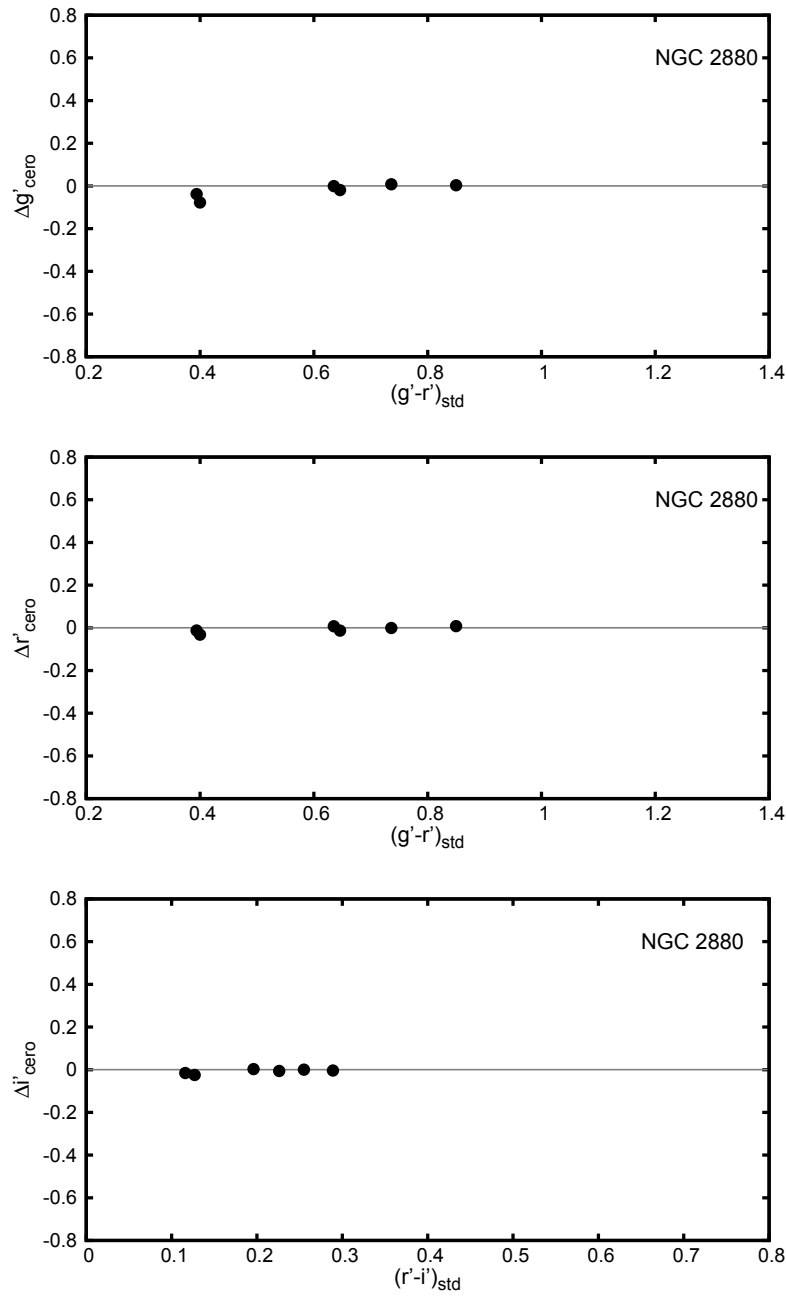


FIGURA 5.2: Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 2880. Las líneas grises indican el valor cero en Δm_{cero} .

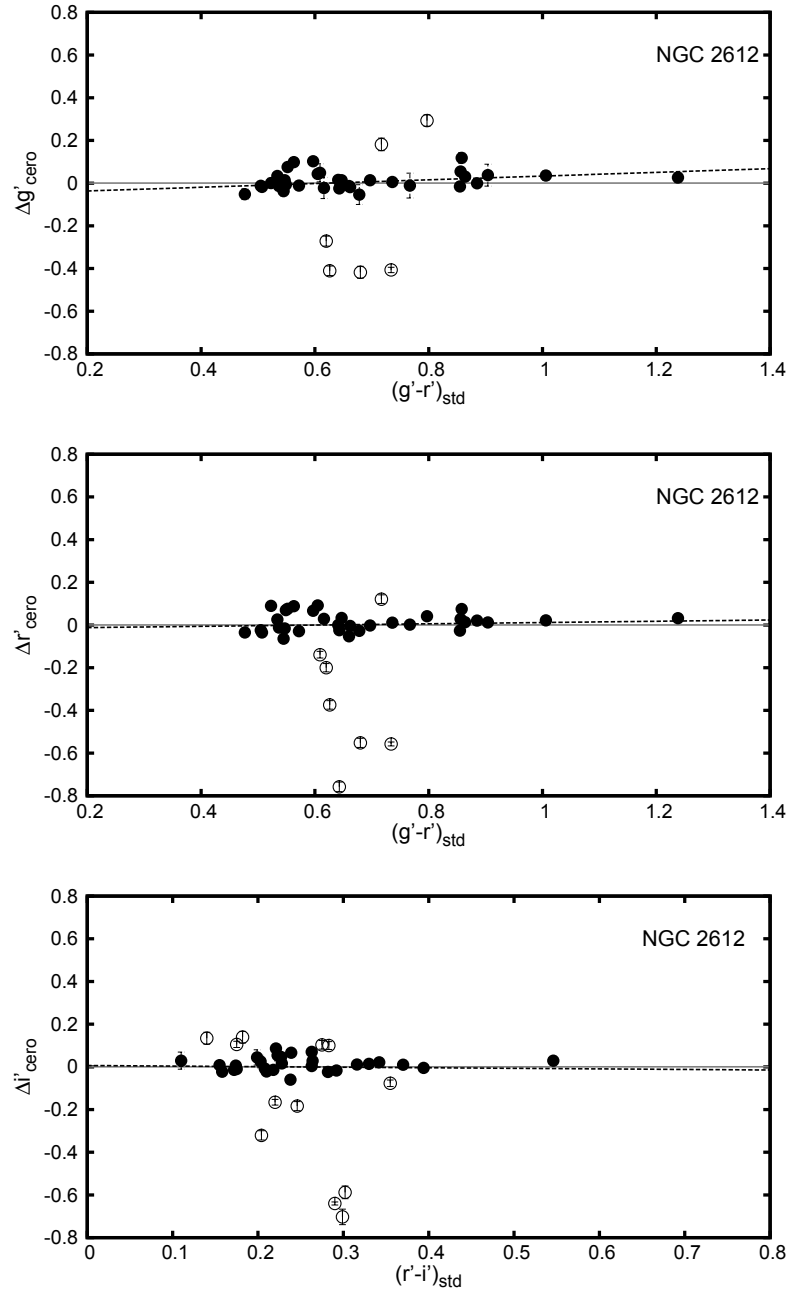


FIGURA 5.3: Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 2612. Los círculos abiertos indican las estrellas estándar que fueron descartadas de los ajustes debido a que se apartaban significativamente de la tendencia media. Las líneas grises indican el valor cero en Δm_{cero} . Las líneas de trazos indican los CT obtenidos para NGC 6861.

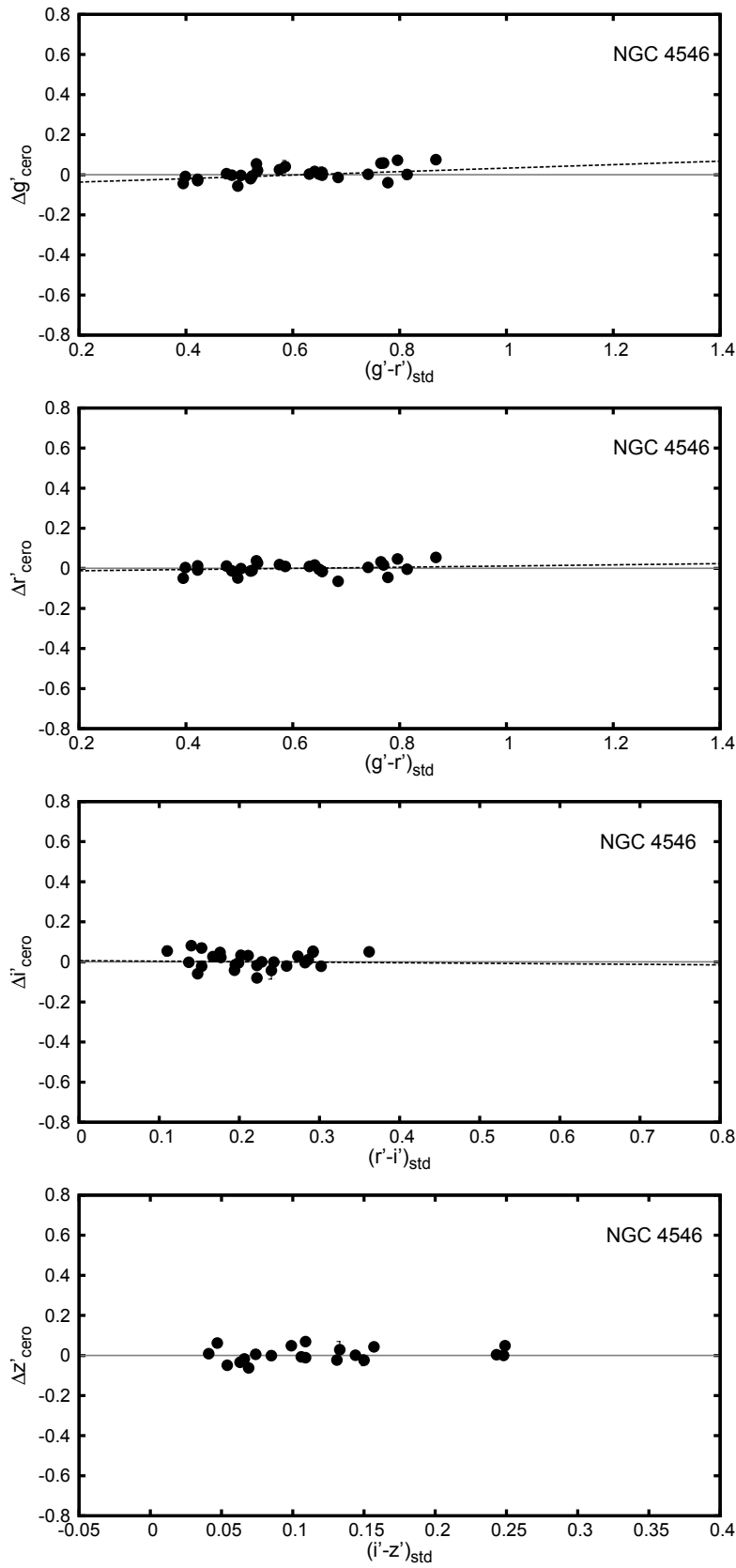


FIGURA 5.4: Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 4546. Las líneas grises indican el valor cero en Δm_{cero} . Las líneas de trazos indican los CT obtenidos para NGC 6861.

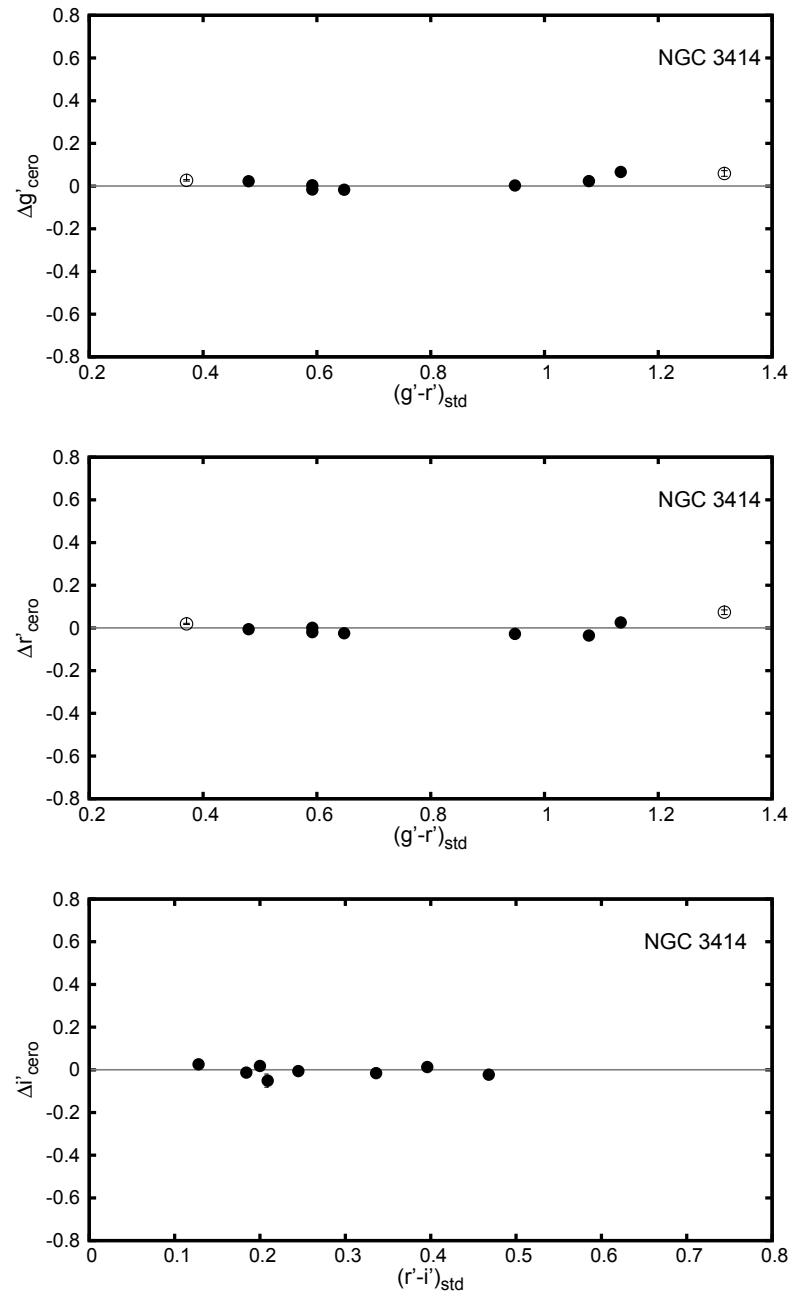


FIGURA 5.5: Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 3414. Los círculos abiertos indican las estrellas estándar que no fueron utilizadas por encontrarse fuera del rango en color empleado para el ajuste. Las líneas grises indican el valor cero en Δm_{cero} .

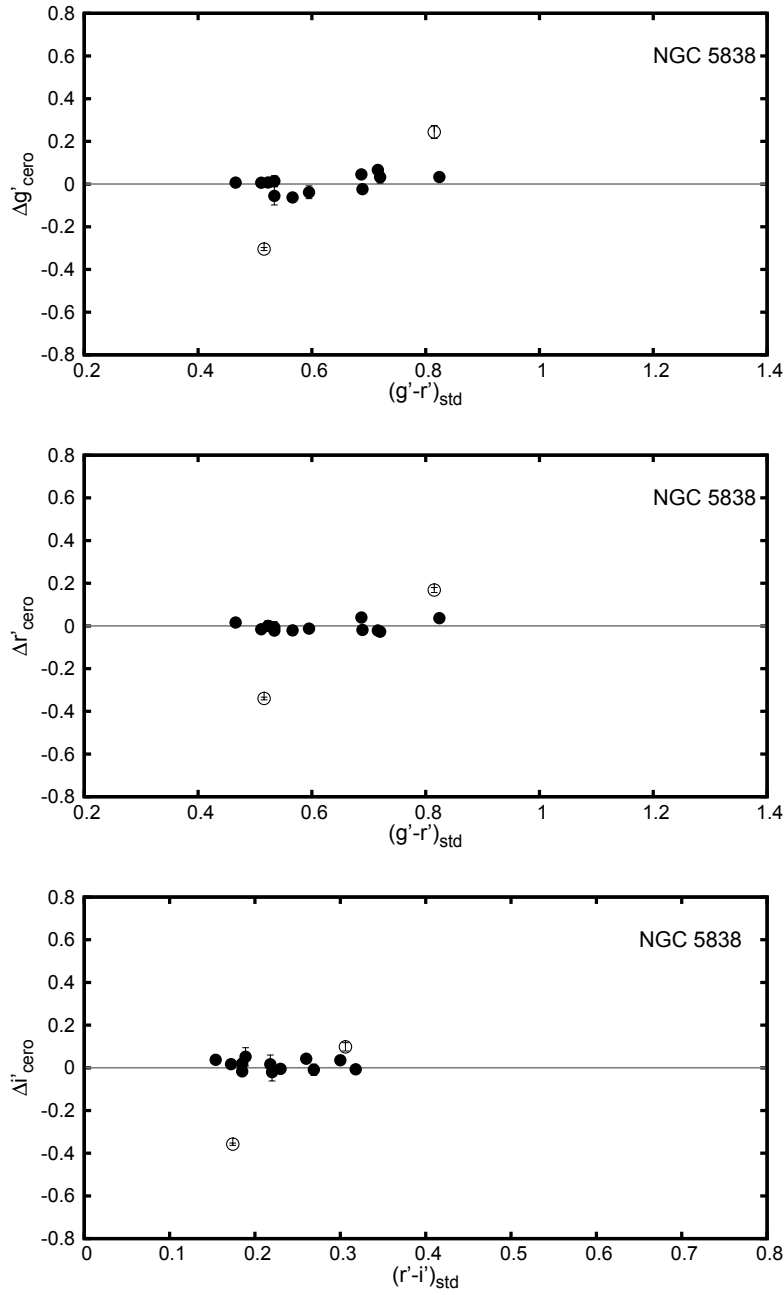


FIGURA 5.6: Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 5838. Los círculos abiertos indican las estrellas estándar que fueron descartadas de los ajustes debido a que se apartaban significativamente de la tendencia media. Las líneas grises indican el valor cero en Δm_{cero} .

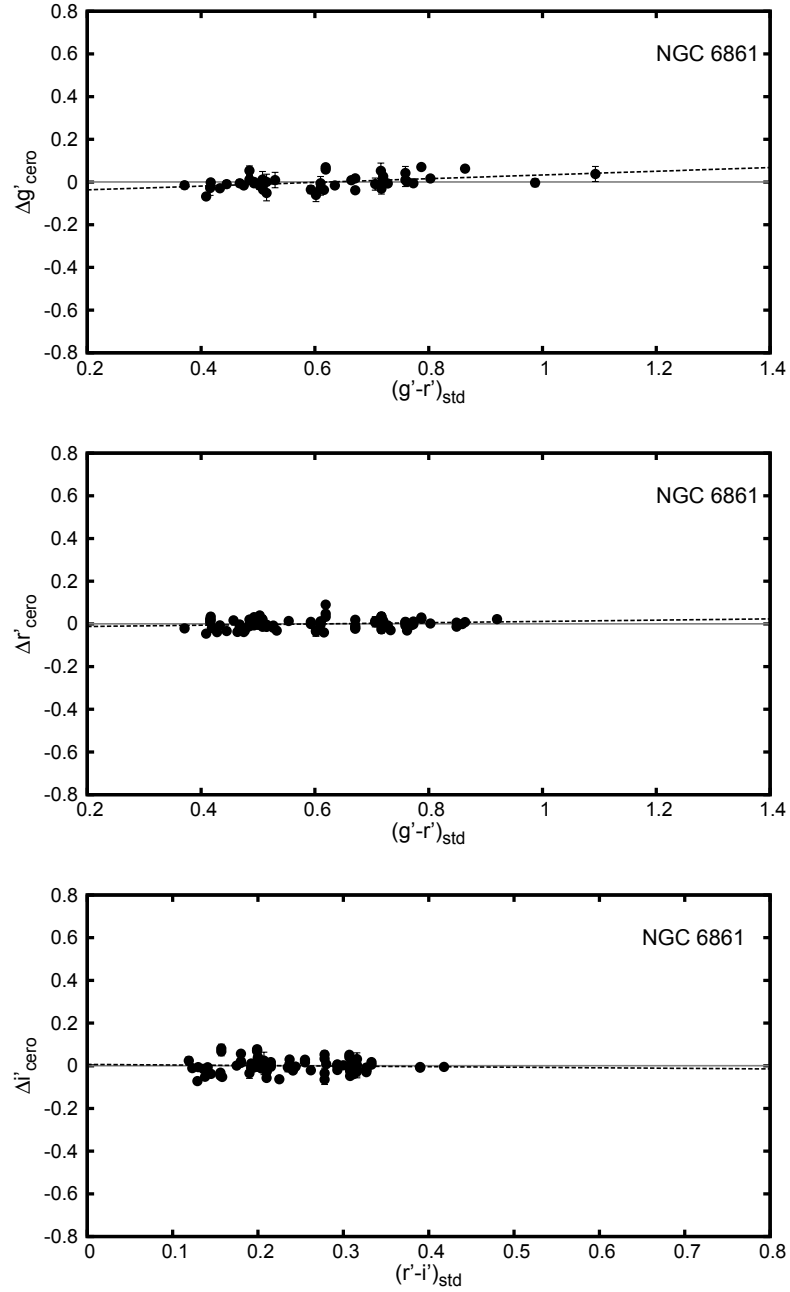


FIGURA 5.7: Puntos de cero residuales en función del índice de color estándar para NGC 6861. Las líneas grises indican el valor cero en Δm_{cero} . Las líneas de trazos muestran los resultados de los ajustes lineales obtenidos para los CT.

5.2 Términos de color para GMOS-S

Como se mencionó anteriormente, en el caso de las observaciones obtenidas con GMOS-S, las estrellas estándar usualmente observadas son aquellas pertenecientes a las listas de Smith et al. (2002) y Smith et al. (2007). En particular, esta última incluye campos de estándares secundarias, más acordes para ser observadas con telescopios de gran apertura. Estos campos son tales que usualmente se cuenta con un gran número de objetos por campo de GMOS. Sin embargo, cabe mencionar que dicha lista tiene como aspecto negativo que nunca ha sido publicada. Específicamente en el caso de NGC 6861 (Fig. 5.7), dado el gran número de estrellas estándar medidas y el amplio rango en colores en que se distribuyen las mismas, fue posible medir los CT para cada filtro. Esto se realizó mediante el ajuste de la relación lineal $\Delta m_{\text{cero}} = a + \text{CT} (m_1 - m_2)_{\text{std}}$ a los residuos de los puntos de cero calculados en la sección anterior. Aquí $(m_1 - m_2)$ corresponde a un color estándar (quinta columna en la Tabla 5.3). El valor del parámetro a , por su parte, nos da las correcciones que deben aplicarse a los puntos de ceros medios obtenidos previamente.

Los resultados de los ajustes para esta última galaxia (ver Tabla 5.3 y Fig. 5.7), muestran que en el caso de los filtros g' y r' se obtienen valores con un alto nivel de significancia, tanto de a , como de CT. Por el contrario, los parámetros obtenidos para el filtro i' son consistentes con cero. Al comparar los valores CT y m_{cero} finales obtenidos para NGC 6861 con los publicados en la página web del Observatorio Gemini (y correspondientes a los detectores E2V), se aprecia que los puntos de cero obtenidos resultan similares, pero no así los valores de los CT. Es necesario remarcar que como ya se mencionó, estos valores suministrados por el Observatorio fueron obtenidos durante una noche específica (13 de mayo de 2008).

En los casos de los campos de estándares en NGC 2612, NGC 4546, el acotado rango de color en algunos casos, y la excesiva dispersión en otros, no permitieron obtener valores de CT confiables (Fig. 5.3 y 5.4). En este contexto, se decidió utilizar los valores de CT obtenidos para NGC 6861 también para las galaxias NGC 2612 y NGC 4546, las cuales fueron observadas en semestres contiguos y con el mismo instrumento GMOS-S que NGC 6861 (ver Tabla 3.1). Así, los valores de CT para estas galaxias que figuran en la Tabla 5.3, no incluyen errores debido a que no corresponden a ajustes. El procedimiento en esos casos fue el de incluir el término de color correspondiente a NGC 6861, mantenerlo fijo, y reobtener los puntos de cero correspondientes.

En el caso del filtro z' , para el cual se cuenta con observaciones únicamente de NGC 4546, los ajustes en el color ($i' - z'$) no mostraron pendiente alguna. Esto se encuentra en completo acuerdo con lo reportado en la página web de GMOS-S. Por ello, se consideró dicho término de color como nulo.

Finalmente, en la Tabla 5.3 se listan los puntos de cero finales y los términos de color empleados para la calibración final de los datos obtenidos a través de GMOS-S. Las magnitudes así calibradas al sistema estándar de Sloan, fueron corregidas luego por los efectos de extinción galáctica, utilizando los valores dados por Schlafly & Finkbeiner (2011).

Galaxia	Filtro	m_{cero}^*	CT	$(m_1 - m_2)$	A_λ
NGC 2549	g'	27.84 ± 0.01	0.07	$(g' - r')$	0.214
	r'	28.32 ± 0.01	0.0	$(g' - r')$	0.148
	i'	28.19 ± 0.01	0.07	$(r' - i')$	0.110
NGC 2880	g'	27.84 ± 0.01	0.07	$(g' - r')$	0.109
	r'	28.29 ± 0.01	0.0	$(g' - r')$	0.076
	i'	28.16 ± 0.01	0.07	$(r' - i')$	0.056
NGC 2612	g'	28.31 ± 0.01	0.08	$(g' - r')$	0.188
	r'	28.36 ± 0.01	0.03	$(g' - r')$	0.130
	i'	27.89 ± 0.01	-0.02	$(r' - i')$	0.097
NGC 4546	g'	28.27 ± 0.01	0.08	$(g' - r')$	0.112
	r'	28.36 ± 0.01	0.03	$(g' - r')$	0.077
	i'	27.98 ± 0.02	-0.02	$(r' - i')$	0.057
	z'	26.84 ± 0.01	0.0	$(i' - z')$	0.043
NGC 3414	g'	28.24 ± 0.01	0.08 ± 0.02	$(g' - r')$	0.083
	r'	28.33 ± 0.01	0.0	$(g' - r')$	0.057
	i'	28.51 ± 0.01	0.06 ± 0.06	$(r' - i')$	0.043
NGC 5838	g'	27.76 ± 0.01	0.07 ± 0.02	$(g' - r')$	0.176
	r'	28.24 ± 0.01	0.0	$(g' - r')$	0.122
	i'	28.13 ± 0.01	0.07 ± 0.04	$(r' - i')$	0.090
NGC 6861	g'	28.36 ± 0.02	0.08 ± 0.03	$(g' - r')$	0.179
	r'	28.42 ± 0.01	0.03 ± 0.01	$(g' - r')$	0.124
	i'	28.01 ± 0.01	-0.02 ± 0.05	$(r' - i')$	0.092

TABLA 5.3: Calibraciones para llevar al sistema estándar. m_{cero}^* : valores finales de punto de cero. CT: términos de color ajustados. A_λ : coeficientes de extinción galáctica en cada filtro.

5.3 Comparación con SDSS y los términos de color de GMOS-N

La fotometría profunda que se logra a través de la calidad de imagen de los datos obtenidos con GMOS, puede resultar degradada si no se cuenta con un número adecuado de estrellas estándar, o bien, si no presentan un rango de colores suficiente para ajustar los CT. Incluso diferencias del orden de algunas centésimas en los puntos de cero se verán luego amplificadas al calcular los colores integrados. Esto, a su vez atentará contra la posibilidad de identificar subpoblaciones con pequeñas diferencias de colores medios entre ellas, o dificultará la comparación entre los distintos sistemas de CGs estudiados.

Con el objetivo de poner a prueba la calidad de las calibraciones al sistema estándar obtenidas en la Sección 5.1, buscamos objetos en común entre los campos de GMOS-N y aquellos observados y medidos por el SDSS *Data Release Twelve* (SDSS DR12, por sus siglas en inglés), el cual posee observaciones realizadas en el hemisferio Norte. Escogimos objetos puntuales, brillantes, cuidando que no se encontraran saturados en las imágenes GMOS, y distribuidos de manera homogénea sobre los campos, descartando aquellos que se encontraban cerca de las galaxias, y que por ello sus magnitudes del SDSS podrían no ser del todo precisas. Si bien la fotometría de SDSS no es tan profunda como la obtenida a través de GMOS, tiene la ventaja de que ha sido cuidadosamente calibrada con observaciones realizadas en el propio sistema fotométrico.

Las Figuras 5.8-5.11 muestran las diferencias $\Delta m'$ entre las magnitudes en los diferentes filtros, en función de los índices de color, para el caso de NGC 2549, NGC 2880, NGC 3414 y NGC 5838, respectivamente.

Dichas figuras muestran que en el caso de los filtros g' , i' parece existir una pendiente detectable, esto es, un término de color. En el caso del filtro r' la situación es menos clara, y la distribución de los puntos parece estar de acuerdo con una pendiente nula dentro del rango de colores analizado.

En este contexto, para estimar los valores de los CT en cada una de las galaxias antes mencionadas, se realizaron ajustes lineales a los ya mencionados $\Delta m'$ en función de los colores, considerando los rangos $0.1 < (g' - r') < 1.2$ y $0 < (r' - i') < 0.9$ mag, en los cuales se ubican comúnmente los CGs. En las Figuras 5.8, 5.9 y 5.11 se observa que los objetos con colores más rojos que $(g' - r') > 1.2$ y $(r' - i') > 0.9$ mag, parecen mostrar una pendiente diferente (mayor). Con lo cual, los mismos no fueron considerados para los ajustes. Es importante recordar que como se mencionó antes, la página web de GMOS no da valores de los CT para GMOS-N. Los únicos valores previos a los calculados aquí son, muy probablemente, aquellos obtenidos por Jørgensen (2009). Sin embargo, como ya se dijo, dichos valores fueron obtenidos en base a observaciones correspondientes a los años 2001 y 2004. Esto es, previo al recubrimiento con plata que actualmente

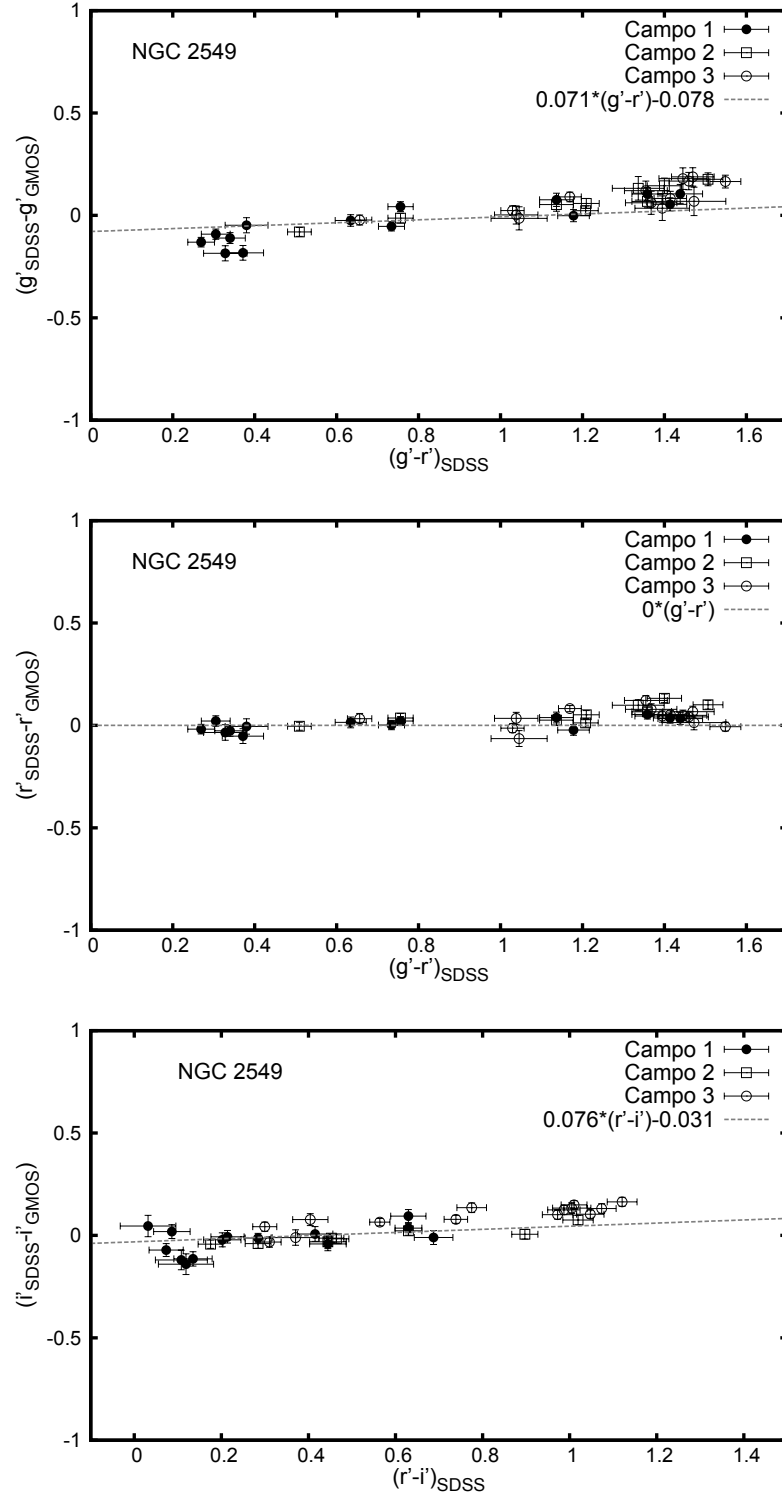


FIGURA 5.8: Comparación fotométrica de objetos puntuales en común entre la fotometría GMOS-N de NGC 2549, y la obtenida de SDSS DR12, en los filtros g' , r' , i' en función de los índices de color. La línea de trazos representa el ajuste de los CT obtenidos para NGC 5838

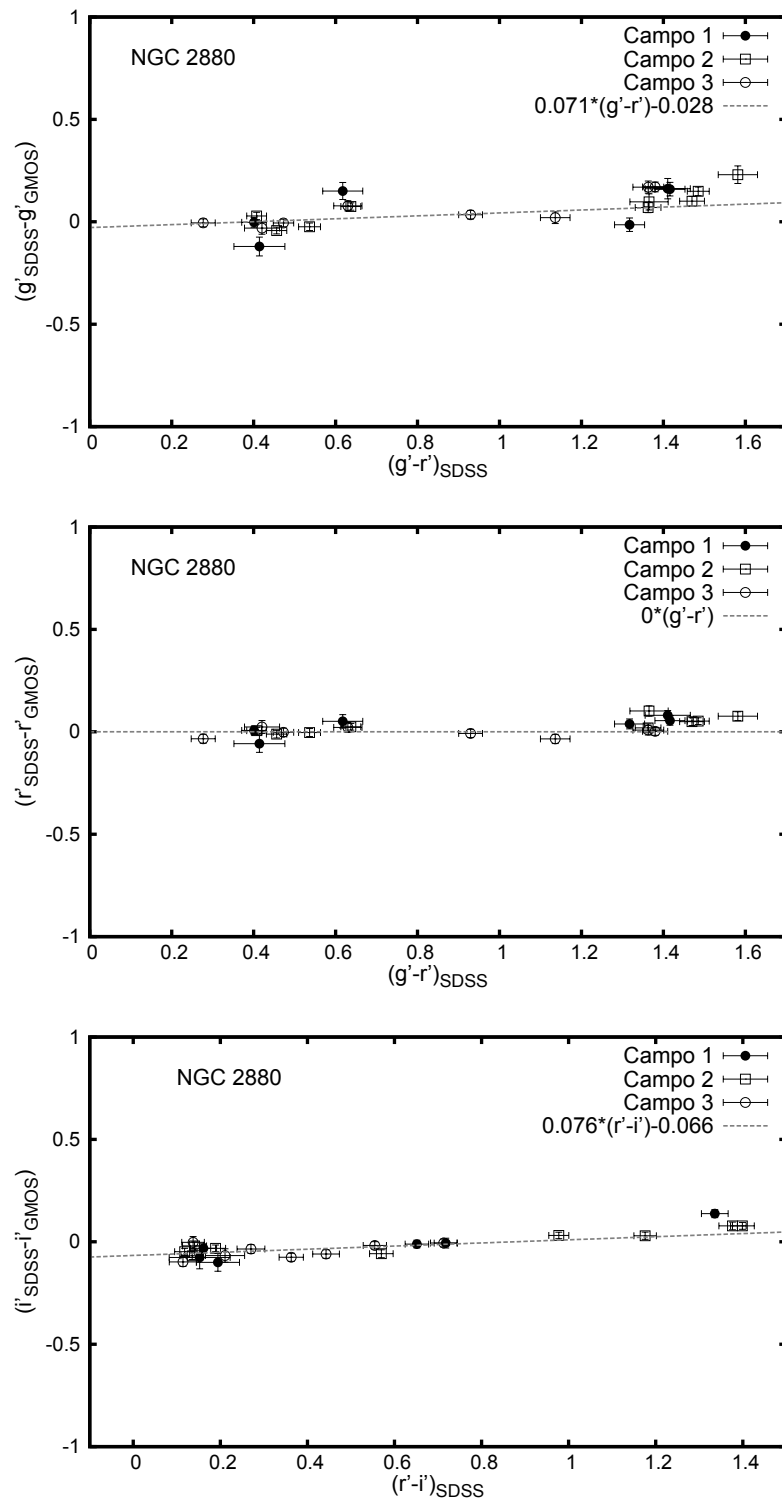


FIGURA 5.9: Ídem para NGC 2880.

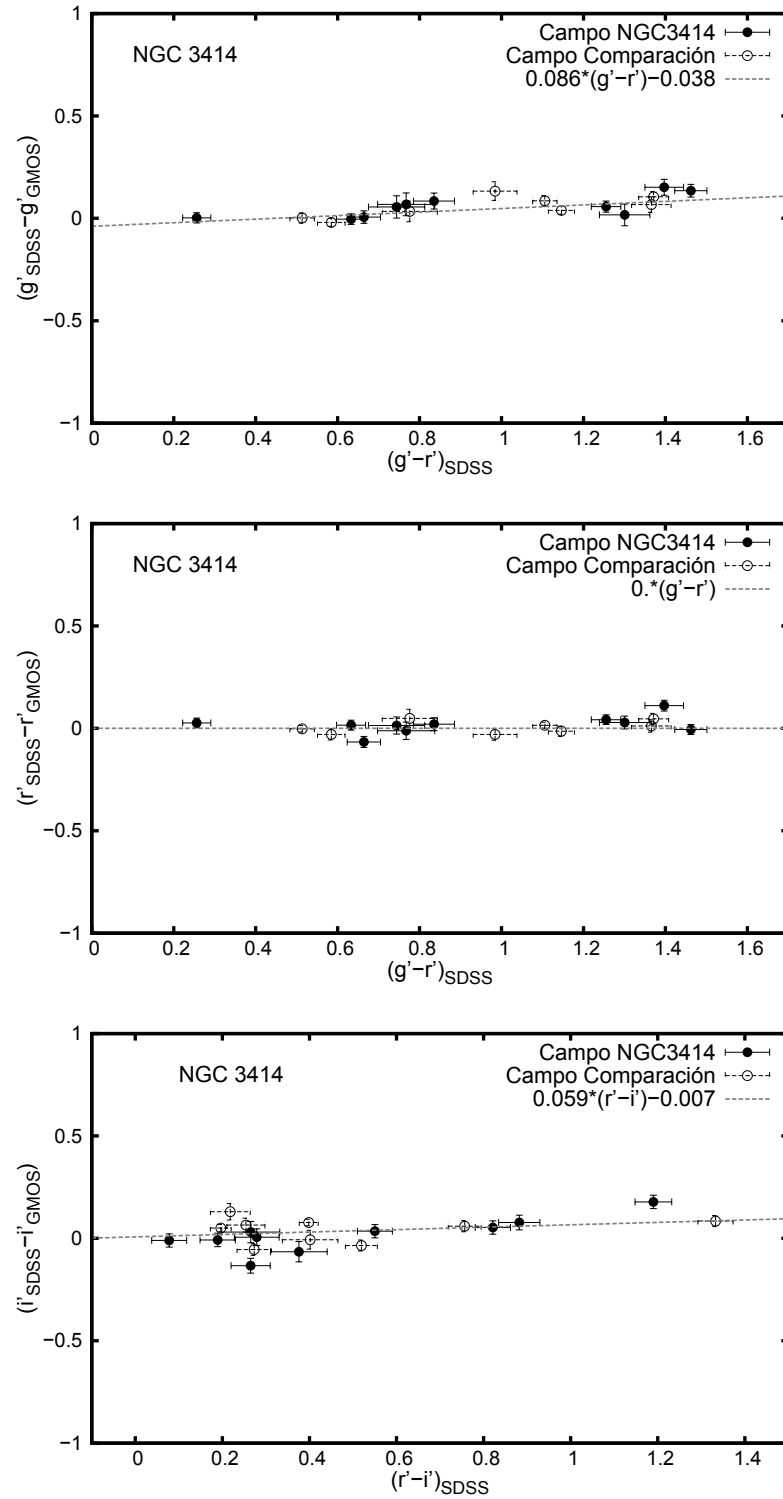


FIGURA 5.10: Comparación fotométrica de objetos puntuales en común entre la fotometría GMOS-N de NGC 3414, y la obtenida de SDSS DR12, en los filtros g' , r' , i' en función de los índices de color. La línea de trazos representa el ajuste de los CT.

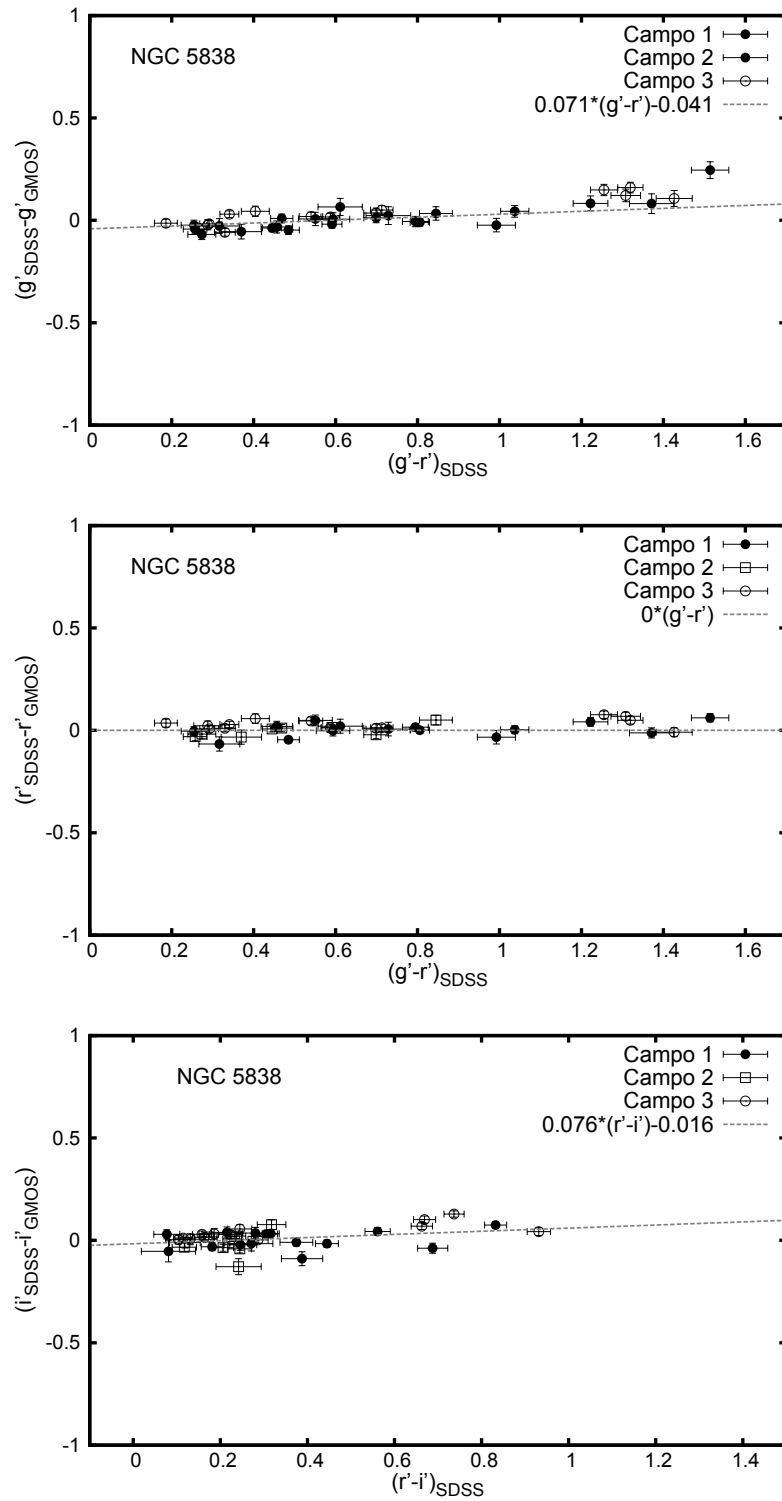


FIGURA 5.11: Comparación fotométrica de objetos puntuales en común entre la fotometría GMOS-N de NGC 5838, y la obtenida de SDSS DR12, en los filtros g' , r' , i' en función de los índices de color. La línea de trazos representa el ajuste de los CT.

poseen ambos telescopios Gemini. Tal y como menciona la autora de dicho trabajo, es de esperar que los valores de los términos de color para los distintos filtros no varíen a lo largo del tiempo en un determinado instrumento, pero diversos factores tales como, el recubrimiento de plata de los espejos antes mencionado e incluso la limpieza de los mismos, pueden llevar a pequeños cambios en estos valores. Por ello, resulta de suma importancia en esta Tesis obtener estimaciones de los CT para cada uno de los filtros.

Dado que el mayor número de estrellas en común entre nuestros datos GMOS y Sloan corresponden a los campos de NGC 5838, se inició el análisis con dicha galaxia. En los diagramas de la Figura 5.11 correspondiente a la misma, se observa que los mencionados objetos se distribuyen adecuadamente dentro de los rangos de colores adoptados. Los valores obtenidos en los ajustes de los CT muestran que, para el filtro r' , la pendiente obtenida es prácticamente nula ($dr'/d(g' - r') = 0.0$), mientras que en los filtros g' e i' , los valores obtenidos en las pendientes resultan similares en ambos casos ($dg'/d(g' - r') = 0.07 \pm 0.02$ y $di'/d(r' - i') = 0.07 \pm 0.04$, respectivamente). Es interesante destacar que los valores obtenidos para esta galaxia resultan similares a los publicados por Jørgensen (2009).

En el caso de la galaxia NGC 2549, al realizar los ajustes en los rangos considerados, los valores de pendientes obtenidos resultan significativamente más altos que para NGC 5838 ($dg'/d(g' - r') \sim 0.19 \pm 0.02$; $di'/d(r' - i') \sim 0.20 \pm 0.02$). Analizando más en detalles los objetos, se observan en la Figura 5.8 claros agrupamientos de objetos en los colores $(g' - r') \sim 0.3$, $(g' - r') \sim 1.4$ (filtro g'). Al visualizar la distribución espacial en las imágenes de GMOS, de aquellos objetos ubicados alrededor de $(g' - r') \sim 0.3$ mag, no se observa que los mismos se encuentren afectados por la presencia de objetos vecinos, o se ubiquen en regiones poco confiables en la imagen, de manera de afectar los valores de sus magnitudes. Además, los mismos se ubican en el campo en que se encuentra la galaxia. Sin embargo, dado que el mencionado grupo de objetos azules pertenece sólo al campo 1, mientras que los rojos al campo 3, no se puede descartar que la alta pendiente resultante de los ajustes se deba a pequeñas diferencias de punto de cero que pueden haber persistido durante las calibraciones entre los campos de NGC 2549. Por otro lado, se puede observar en la figura correspondiente a esta galaxia, que el ajuste obtenido para NGC 5838 resulta muy adecuado para los objetos dentro del rango de colores de los CGs típicos.

En los campos de NGC 2880, el número de objetos en común entre la fotometría GMOS y Sloan con magnitudes confiables, resulta ser muy bajo y muy mal distribuidos en el color $(g' - r')$. La mayor parte de los mismos se agrupan especialmente en los colores $(g' - r') \sim 0.4$ y $(r' - i') \sim 0.15$ (Fig. 5.9). Por ello, en este caso se optó por no realizar un ajuste de los coeficientes. Sin embargo, al igual que ocurre con los valores de NGC 2549, se ve aquí también que los resultados obtenidos para NGC 5838 producen

una muy buena descripción de la tendencia observada para objetos en el rango de colores de los CGs (Figura 5.9).

Considerando que las observaciones de las galaxias NGC 2549, NGC 2880 y NGC 5838 fueron realizadas utilizando los mismos detectores (e2v DD), y además, que los ajustes de los CT obtenidos en las dos primeras resultaron ser poco confiables, se decidió utilizar los valores CT de NGC 5838 sobre las dos primeras también. Esto significa que se mantuvo fijo el valor de los coeficientes CT en aquellos obtenidos para NGC 5838, y se reobtuvieron los correspondientes puntos de cero. Los valores resultantes se listan en la Tabla 5.3.

Finalmente, como se muestra en la Tabla 3.1, las observaciones correspondientes a la galaxia NGC 3414 fueron realizadas en el año 2013. Esto es, son datos obtenidos luego del cambio de los detectores CCDs en GMOS-N (ver Capítulo 3). Por tal razón, resulta necesario obtener los puntos de cero y CT de manera independiente a los estimados para NGC 5838. Se aplicó entonces tanto al campo de la galaxia, como al correspondiente campo de comparación, el mismo procedimiento que a las otras tres galaxias observadas con GMOS-N. Se realizaron los ajustes, y los valores obtenidos para esta galaxia ($dg'/d(g'-r') = 0.08 \pm 0.02$; $dr'/d(g'-r') = 0.0$ y $di'/d(r'-i') = 0.06 \pm 0.06$) resultaron notablemente similares a los hallados para NGC 5838 y los CCDs e2v DD. Sin embargo, cabe mencionar que lo mismo no es válido para los puntos de cero, ya que la Tabla 5.3 muestra que hay una gran diferencia en los puntos de cero para GMOS-N en los filtros g' e i' a partir del cambio de CCDs.

Los valores de CT y las correspondientes correcciones a los puntos de cero medios obtenidos en el análisis de las cuatro galaxias mencionadas en esta sección, fueron adoptados como calibraciones finales. Dichos valores se listan en la Tabla 5.3. Las magnitudes así calibradas, fueron finalmente corregidas luego por los efectos de extinción galáctica, utilizando los valores dados por Schlafly & Finkbeiner (2011).

Cabe mencionar finalmente, que lo expuesto aquí no implica que el comportamiento de los términos de color para calibrar las magnitudes medidas con GMOS al sistema estándar de Sloan no puedan ser más complejas que lo aplicado en esta Tesis. Un análisis más detallado que incluye un rango mucho más amplio en los colores, está siendo realizado con un conjunto más amplio de datos, y su inclusión escapa al objetivo de esta Tesis. Lo que se ha buscado aquí es únicamente garantizar, lo mejor posible, la calibración para aquellos objetos con colores típicos de CGs.

5.4 Estimaciones de completitud

Para cuantificar un límite confiable de detección de objetos no resueltos en los diferentes catálogos fotométricos, realizamos una serie de pruebas de completitud en cada campo. Para ello consideramos el filtro que presentaba el mayor número de detecciones de fuentes, y que por tal motivo, fue previamente adoptado como referencia para la detección de objetos y su posterior fotometría. Para cada una de estas pruebas, se generaron un total de 9600 fuentes puntuales artificiales, que a intervalos de 0.2 mag se fueron añadiendo en grupos de 200 objetos hasta cubrir el rango de magnitudes de ~ 19 a 29. Para llevar adelante este proceso se utilizó la tarea STARLIST, la cual genera una muestra de objetos artificiales distribuidos al azar, y luego la tarea ADDSTAR, la cual agrega dichos objetos a la imagen en cuestión utilizando el modelo PSF previamente obtenido.

En aquellos campos de ciencia que contienen las galaxias, se utilizó una ley de potencia para reproducir la distribución espacial concentrada de los candidatos a CGs, mientras que en los restantes campos, tal como se indicó anteriormente, se utilizó una distribución uniforme.

Posteriormente, se utilizaron los mismos procedimientos ya mencionados en la Sección 3.2, con el objetivo de detectar y recuperar los objetos añadidos.

En los paneles izquierdos de la Figura 5.12 se muestran las curvas de completitud para los campos de ciencia de cada galaxia. En ellos se grafica la fracción de objetos artificiales recuperados (f), en función de la magnitud de referencia. De igual manera, se graficaron las pruebas de completitud para diferentes rangos de magnitudes escogidos de forma aleatoria, como función del radio galactocéntrico R_{gal} (paneles derechos de la Fig. 5.12).

Como puede observarse en las figuras, la completitud posee una fuerte dependencia espacial. Esto se debe a que gran parte de los objetos se pierden a R_{gal} pequeños como consecuencia del aumento del ruido poissoniano generado por el alto brillo de las galaxias en sus zonas internas. Por ello, como se aprecia en la muestra, es esperable obtener una menor completitud en los campos donde se encuentran las galaxias. Sin embargo, en algunas situaciones esto puede no ser así debido a las diferencias de los valores de *seeing* de las distintas imágenes. Este efecto se observa claramente en las curvas de completitud de los campos pertenecientes a NGC 2880. Allí el *seeing* del campo 2 es peor que en los campos 1 y 3, por lo que en dicho caso, la completitud en dicho campo resulta menor aún cuando no contiene a la galaxia (ver Tabla 3.1).

Con el objetivo de generar catálogos homogéneos en cuanto a su nivel de completitud, posteriormente utilizados en el análisis de los diagramas color-magnitud e histogramas de color integrado (ver Capítulos 7 y 8), adoptamos como límite en el extremo débil aquellas magnitudes que aseguren una muestra con una completitud mayor o igual al

80%. Esto es, el valor de magnitud según el filtro considerado, donde f alcanza 0.8. Como se mencionó anteriormente, los filtros empleados fueron aquellos que presentaban el mayor número de detecciones de fuentes. En la Tabla 5.4 se listan los valores adoptados para el extremo débil en magnitud.

Galaxia	Filtro	Mag (80%)
NGC 2549	r'	24.8
NGC 2880	r'	25.4
NGC 2612	g'	25.5
NGC 4546	r'	24.8
NGC 3414	g'	26.0
NGC 5838	g'	25.5
NGC 6861	g'	25.5

TABLA 5.4: Magnitudes límites correspondientes a una completitud de 80%, de acuerdo a los filtros empleados en cada galaxia.

Diversos autores (Fleming et al. 1995; Wehner et al. 2008) utilizaron la función de interpolación de Pritchett para representar el comportamiento seguido por f en función de la magnitud. Contar con una expresión analítica de este tipo, resulta útil al estudiar la función de luminosidad de cada sistema de CGs (ver Capítulo 11). La expresión está dada por:

$$f = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\alpha(m - m_{\text{lim}})}{\sqrt{1 + \alpha^2(m - m_{\text{lim}})^2}} \right] \quad (5.4)$$

siendo m_{lim} la magnitud que se alcanza a $f = 0.5$, y α el parámetro que indica la pendiente de la curva en los alrededores de m_{lim} . Sin embargo, al realizar los mencionados ajustes hemos encontrado que en muchos casos dicha función no produce resultados aceptables en todo el rango de interés. Por ello, se optó por realizar ajustes en dos tramos del rango de magnitudes. Estos tramos se eligieron de manera tal de obtener una unión suave entre las funciones resultantes. Cabe recordar aquí que con este procedimiento no se busca más que contar con una función analítica que reproduzca razonablemente bien el comportamiento global de $f(m)$, para que luego pueda ser utilizada para corregir por completitud las muestras fotométricas. A modo de ejemplo, se representa la función ajustada para la curva de completitud de NGC 2612 (línea punteada en panel izquierdo de la Figura 5.12, correspondiente a dicha galaxia).

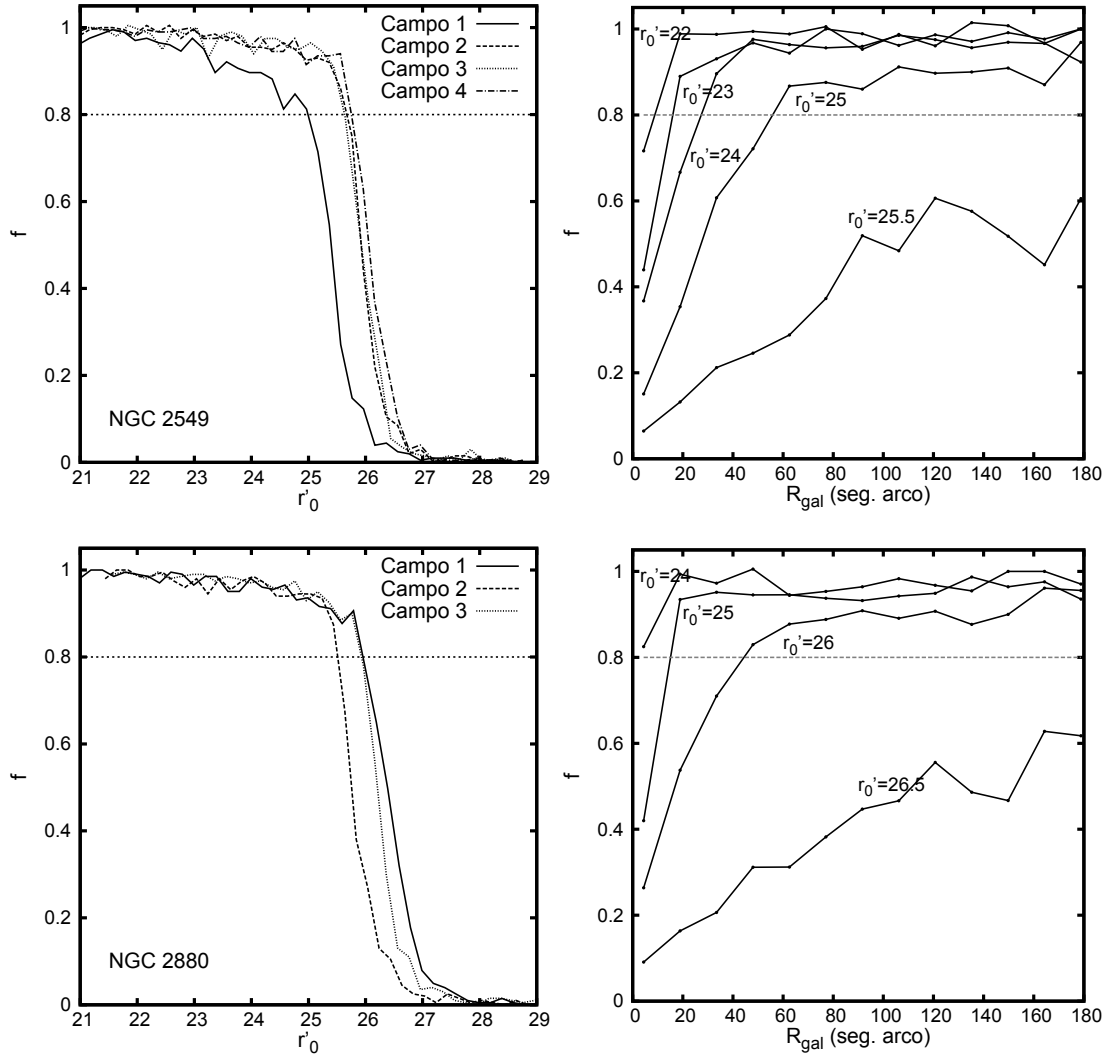


FIGURA 5.12: Fracción de completitud (f) en función de la magnitud (paneles izquierdos) y en función del radio galactocéntrico (paneles derechos) para los campos de NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861, respectivamente. La línea punteada horizontal en $f = 0.8$, indica el nivel de completitud escogido. En el caso de NGC 2612, la línea punteada muestra la función de interpolación de Pritchett.

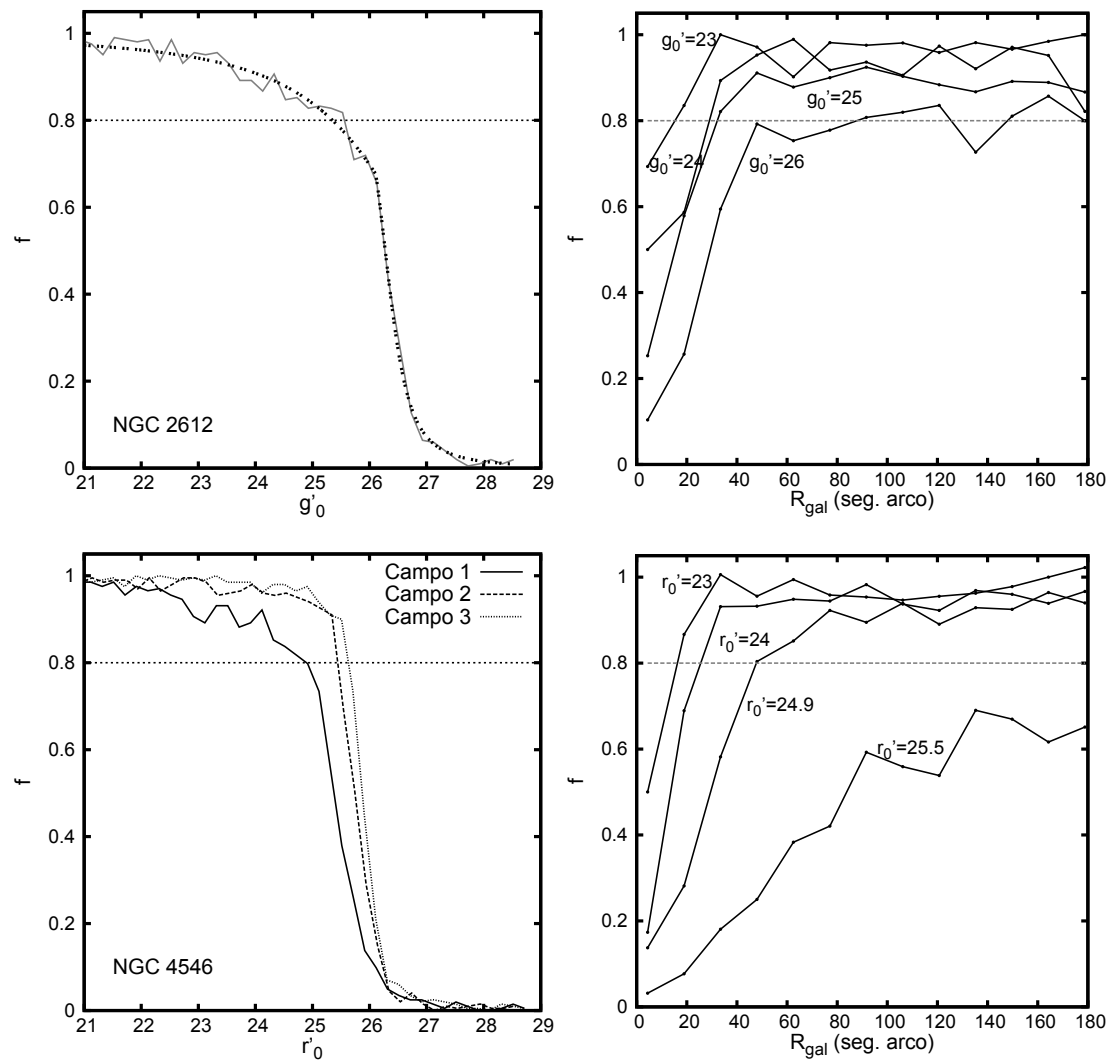


FIGURA 5.12: Continuación

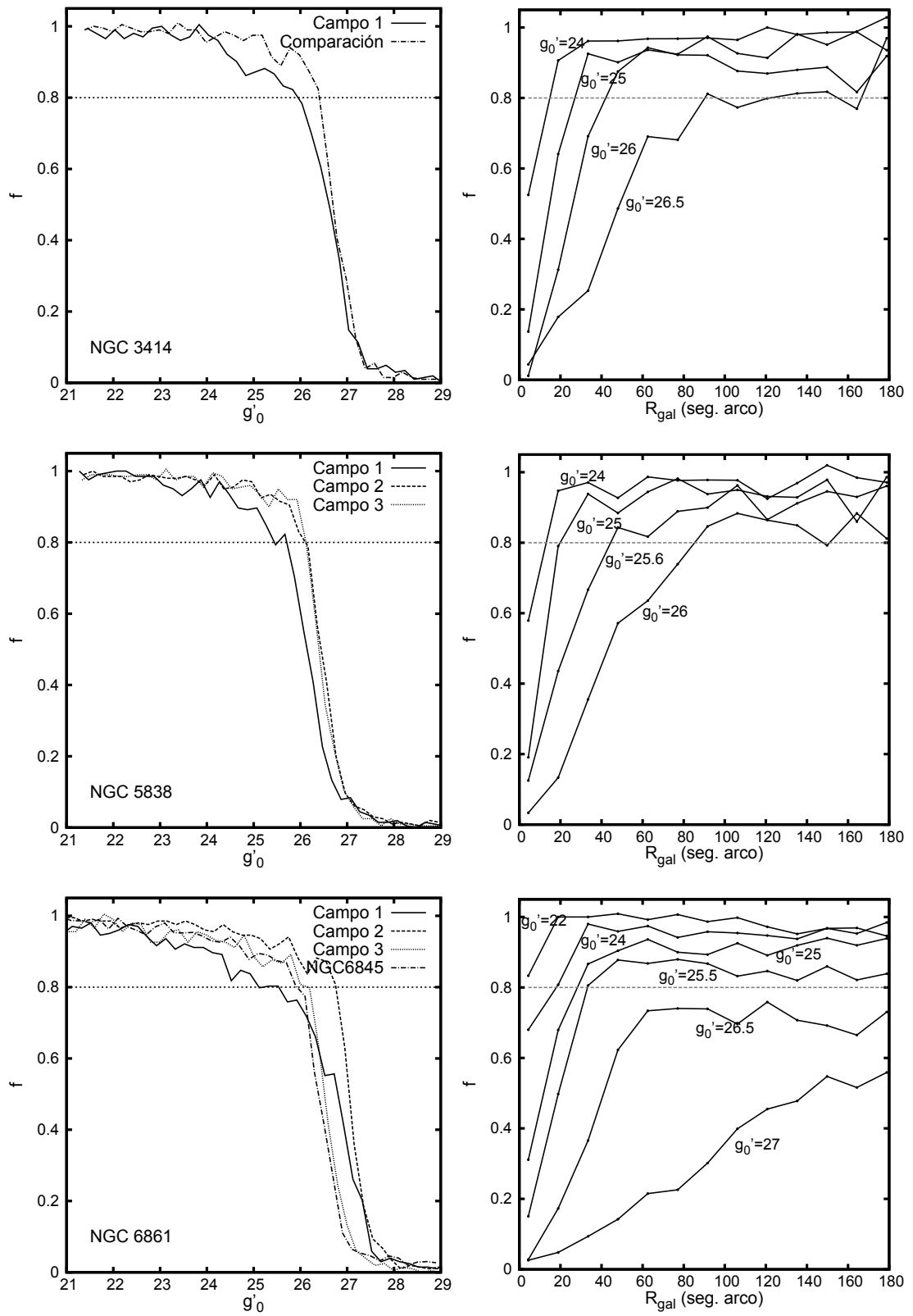


FIGURA 5.12: Continuación.

Capítulo 6

Análisis fotométrico de las galaxias de la muestra

6.1 Perfiles de brillo superficial de las galaxias

En la literatura existen numerosos casos donde se ha encontrado que el perfil de densidad numérica proyectada de los CGs muestra similitudes con el perfil de brillo superficial de la galaxia a la que pertenecen. En la mayoría de los casos se observa que en las zonas internas de las galaxias son los CGs rojos los que muestran un marcado parecido (Bassino et al. 2008; Faifer et al. 2011; Strader et al. 2011; Forbes et al. 2012). En las zonas externas, por otro lado, es esperable que sean los azules quienes muestren mayor parecido con la distribución de luz del halo de las galaxias (Forte et al. 2007, 2009, 2014). Tal comportamiento tiene, probablemente, origen en el hecho de que se supone que existe una relación muy estrecha entre la población estelar difusa del bulbo y los CGs rojos, y entre la población estelar del halo y los CGs azules. Esta relación, a su vez, se encuentra asociada al hecho de que es natural esperar que cada vez que se formó un CG, también se formó una masa en estrellas que posteriormente pasó a integrar la componente del halo, o del bulbo, según corresponda. Justamente esto es el nudo central de trabajos como los de Forte et al. antes mencionados.

En tal contexto, y con el objetivo de poder comparar las distribuciones espaciales de las muestras de candidatos a CGs de esta Tesis con las distribuciones de luz de las galaxias a las que pertenecen, es que se obtuvieron los perfiles de brillo superficial de las mismas. Para ello, mediante la tarea ELLIPSE del paquete STSDAS.ANALYSIS.ISOPHOTE de IRAF, se ajustaron isofotas elípticas (curvas cerradas de brillo superficial constante) a las imágenes. La técnica utilizada por esta tarea sigue el procedimiento descrito en Jedrzejewski (1987). La calidad de dicho ajuste es evaluada mediante la inspección de la distribución de brillo unidimensional como función del ángulo de posición (AP), es

decir, se analiza el contenido armónico de la distribución:

$$I = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin(n AP) + B_n \cos(n AP)), \quad (6.1)$$

donde I_0 es la intensidad media a lo largo de la elipse, y A_n, B_n ($n=1,2,\dots$) las amplitudes armónicas. Esto se refleja en los valores que toman los términos de Fourier (A_3, B_3, A_4, B_4) entregados por ELLIPSE. De estos últimos, uno de los términos más significativos y que utilizaremos en el análisis siguiente, es el coeficiente B_4 . De acuerdo al valor que tome dicho parámetro es posible clasificar las galaxias E y S0 en los tipos “disco” ($B_4 > 0$) o “caja” ($B_4 < 0$).

La ejecución de la tarea ELLIPSE se realizó sobre las imágenes correspondientes a los filtros g' e i' , de manera de obtener posteriormente los perfiles de color ($g' - i'$) de cada galaxia, y poder compararlos con los perfiles radiales de colores integrados de los sistemas de CGs asociados (ver Capítulo 10).

Durante el ajuste de las isofotas en cada galaxia y para cada valor de semieje mayor, se permitió, en todos los casos, la libre variación del centro, elipticidad (e) y AP . Esto, como es de esperar, sólo fue posible en las zonas de las galaxias donde la señal es lo suficientemente alta como para asegurar la convergencia del proceso. En las zonas externas, donde justamente la cantidad de luz proveniente de la componente estelar es pequeña, se debieron fijar todos los parámetros antes mencionados. En esta etapa es necesario enmascarar los objetos brillantes (puntuales y/o extendidos) presentes en los campos, debido a que la contribución de la luz por parte de los mismos puede provocar desviaciones en el ajuste de las isofotas, originando mediciones incorrectas.

Como se ha mencionado anteriormente, debido a que el campo de visión de las cámaras GMOS es relativamente pequeño, y a que el proceso de corrección por *flat-field* de las imágenes no siempre produce los resultados óptimos (ya que sobreviven gradientes), debe prestarse mucha atención y poner cuidado sobre el trabajo de ELLIPSE. Por ello, fue necesario realizar diferentes pruebas de ajuste, verificando en cada caso que los residuos obtenidos al realizar la sustracción del modelo obtenido, fuesen lo más razonable posible. Sin embargo, cabe destacar que tratándose de galaxias de tipo S0, con diferentes componentes (tales como discos, bulbos, barras, etc.), resulta obvio que un ajuste de estas características siempre dejará residuos significativos.

Es importante remarcar que las galaxias estudiadas ocupan casi la totalidad del campo de visión de GMOS, por lo que resulta dificultoso o imposible estimar un valor de cielo verdadero en las mismas, aun cerca de los bordes de las imágenes. Las distintas pruebas realizadas sobre las imágenes de cada galaxia, mostraron que los perfiles de brillo medidos resultan confiables dentro de $R_{\text{gal}} < 1.5$ minutos de arco. Luego de este límite, los perfiles comienzan a verse afectados por diversos factores, tales como la incerteza en

el valor de cielo, y también por la no-uniformidad de las imágenes cerca de los bordes (debido a defectos en la corrección por *flat-field*).

La tabla obtenida en cada ejecución de ELLIPSE contiene una fila por cada isofota ajustada, con información de diversos parámetros. Solo algunos de ellos se utilizarán en los siguientes análisis: la longitud del semieje mayor, la intensidad media de la isofota y su error, la elipticidad y ángulo de posición con sus respectivos errores. La calibración de estos datos al correspondiente sistema fotométrico se realizó utilizando la siguiente expresión:

$$\mu(r) = C_0 - 2.5 \log_{10} \left(\frac{I(r)}{t E^2} \right), \quad (6.2)$$

siendo t el tiempo de exposición, E la escala del detector en segundos de arco por píxel (0.146 segundos de arco por píxel para las imágenes GMOS obtenidas con *binning* 2×2), y C_0 la constante de transformación al sistema fotométrico del SDSS (la misma incluye las correcciones que fueron mencionadas en la Sección 5.1).

Con el objetivo de contar con perfiles de brillo que incluyeran las zonas externas de cada galaxia, se utilizaron imágenes de 20×20 minutos de arco obtenidas del SDSS DR12 en los filtros g' e i' . Dicho relevamiento posee observaciones realizadas en el hemisferio norte, con lo cual solo fue posible obtener imágenes pertenecientes a las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 3414 y NGC 5838. Se empleó nuevamente la tarea ELLIPSE sobre estas imágenes, permitiendo la libre variación de los parámetros en el ajuste en las zonas internas. La posterior calibración de las tablas obtenidas para cada galaxia, se realizó utilizando la expresión 6.2, con los valores $C_0 = 22.5$ mag y $E = 0.396$ segundos de arco por píxel (los mismos se obtuvieron de la página web de SDSS¹). Durante este proceso, se tuvo en consideración que las imágenes de SDSS ya cuentan con un valor de cielo sustraído, y que se encuentran divididas por el correspondiente tiempo de exposición.

Luego, los perfiles obtenidos mediante las imágenes de SDSS fueron empalmados con aquellos medidos en las imágenes GMOS. En los cuatro casos dichos perfiles logran un acuerdo excelente. De esta forma, los perfiles finales de las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 3414 y NGC 5838 son tales que hacen uso de la excelente calidad de imagen de GMOS para $R_{\text{gal}} < 1.5$ minutos de arco (*seeing* < 1 segundo de arco), y el gran campo de las imágenes de Sloan para las zonas externas (aunque menos profundas).

En el caso de NGC 6861 se extendió el perfil de brillo superficial utilizando los campos 1 y 2. Aun cuando las imágenes de estos campos fueron observadas en diferentes días, las condiciones fotométricas resultaron similares. Por ello, se siguió el mismo procedimiento que el utilizado por la tarea IMCOADD, empleando el solapamiento entre dichos campos para igualar la señal y el nivel de cielo entre las imágenes g' , y así construir un mosaico que incluye los mismos. Luego de chequear la escala fotométrica comparando objetos en

¹<http://www.sdss.org/dr12/algorithms/magnitudes/>

común entre la imagen original y la imagen mosaico, se ejecutó ELLIPSE y se obtuvo el perfil alcanzando 6 minutos de arco de semieje mayor (sma). La zona más interna del perfil ($sma < 70$ segundos de arco), que se encuentra saturada en las imágenes de larga exposición, fue obtenida mediante la ejecución de ELLIPSE sobre la imagen g' de corta exposición obtenida junto con las de larga exposición.

En la Figura 6.1 se presentan los perfiles de brillo superficial finales para cada una de las galaxias de la muestra. Si bien no está entre los objetivos particulares de esta Tesis realizar un análisis profundo de los mismos, es posible mencionar algunas particularidades. Entre ellas, la más evidente es la presencia de distintas componentes en dichos perfiles. Ello se evidencia como pequeños cambios de pendiente en los mencionados perfiles. El caso más obvio y extremo de la muestra es el de NGC 5838, donde es muy clara la presencia de por lo menos tres componentes. Esto, tratándose de galaxias de tipo lenticular, no es más que el reflejo de la presencia de estructuras de disco, bulbo, halo y barras en dichas galaxias.

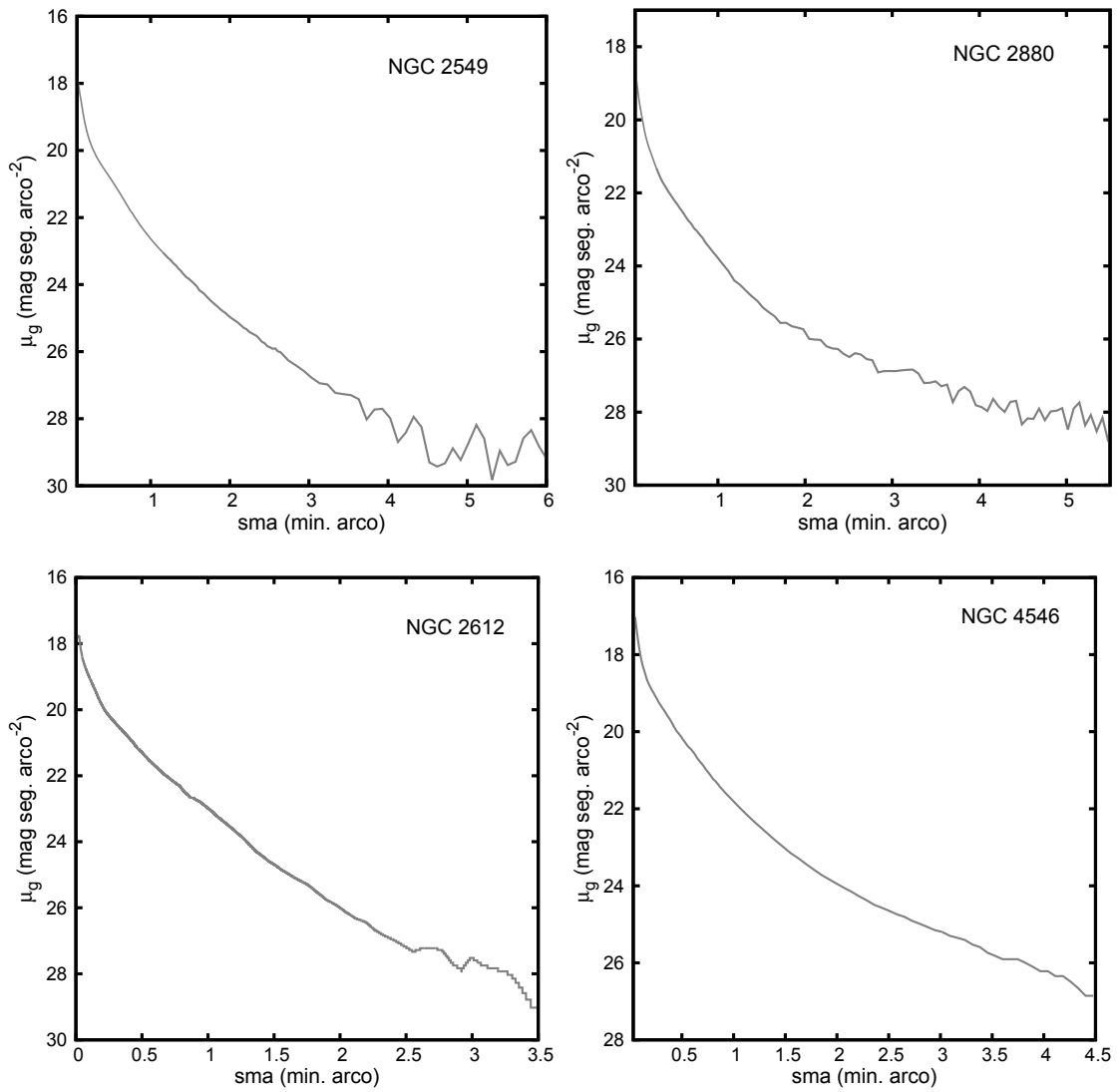


FIGURA 6.1: Perfiles de brillo superficial radial para las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861, respectivamente.

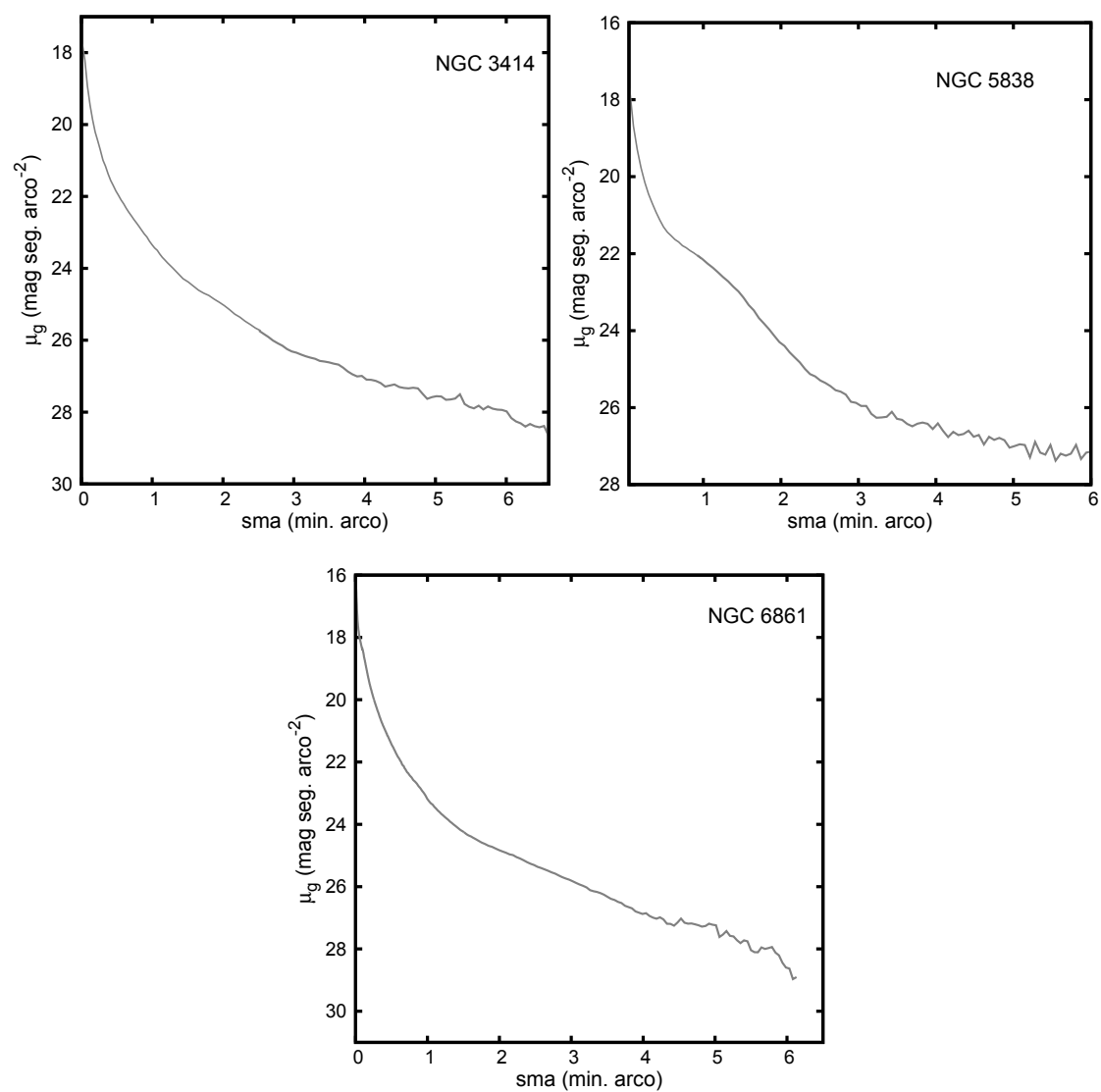


FIGURA 6.1: Continuación.

6.2 Análisis isofotal

Como se mencionó en la sección anterior, la tarea ELLIPSE permite obtener diversos parámetros geométricos (e , AP , A_3 , B_3 , A_4 , B_4 , entre otros). El estudio del comportamiento de los mismos en función de la distancia al centro de la galaxia, puede brindar información valiosa sobre las características de las distintas componentes que conforman a cada galaxia. Esto, a su vez, permite obtener indicios y/o realizar alguna inferencia acerca de posibles interacciones y/o fusiones que podrían haber sufrido las mismas (Kormendy & Bender 1996; Li et al. 2011).

En este contexto, y con el objetivo de analizar la presencia o no de evidencias de los procesos antes mencionados, es que se presentan en las Figuras 6.2 a 6.15 la variación de los parámetros mencionados anteriormente en función del radio galactocéntrico equivalente r_{eq} para cada galaxia. Este último fue calculado como la raíz cuadrada del producto entre el semieje mayor y el semieje menor de las elipses ajustadas, esto es $\sqrt{a b}$. Dado que el mapa de color nos brinda información sobre las distintas componentes estelares y la presencia o no de polvo, se obtuvieron además dichos mapas. Para obtenerlos, en cada caso se utilizaron las imágenes g' e i' , transformando al sistema estándar las mismas mediante la Expresión 6.2, y luego obteniendo la diferencia entre ellas. A continuación se describen algunas particularidades observadas en cada caso.

NGC 2549: en la Figura 6.2 se observa que la e de esta galaxia se mantiene constante de $r_{eq} = 0$ hasta ~ 0.8 minutos de arco, disminuyendo ligeramente luego en la zona externa. Allí alcanza un valor de ~ 0.57 . Un comportamiento similar es mostrado por el AP , el cual se mantiene casi constante en todo el rango medido, mostrando sólo pequeñas variaciones de no más de 4° . Por su parte, el parámetro B_4 cambia su signo a partir de $r_{eq} \sim 0.3$ minutos de arco, transformando las isofotas de tipo “caja” a isofotas tipo “disco”. Es interesante mencionar que las isofotas de tipo caja son generalmente indicativas de fusiones recientes (Kormendy & Bender, 1996). Este comportamiento también fue detectado en el trabajo de Michard & Poulain (2000), utilizando imágenes de la cámara HRCam del *Canada France Hawaii Telescope* (CFHW, por sus siglas en inglés) en los filtros B y R .

La conclusión sobre tal comportamiento de B_4 es que dentro de $r_{eq} \sim 0.3$ minutos de arco estamos viendo un pequeño bulbo. Los autores mencionan además una posible estructura de anillo en el disco de esta galaxia, estructura que sería la responsable por la pequeña “joroba” en los valores de B_4 presente en $sma \sim 33$ segundos de arco ($r_{eq} \sim 0.3$ minutos de arco). En los resultados presentes aquí, se puede apreciar una “joroba” externa extra en $sma \sim 1.2$ minutos de arco ($r_{eq} \sim 0.7$ minutos de arco) que no ha sido reportada previamente en la literatura. La interpretación de estas estructuras como posibles anillos, las cuales se diferencian de las componentes de “lentes” debido a que

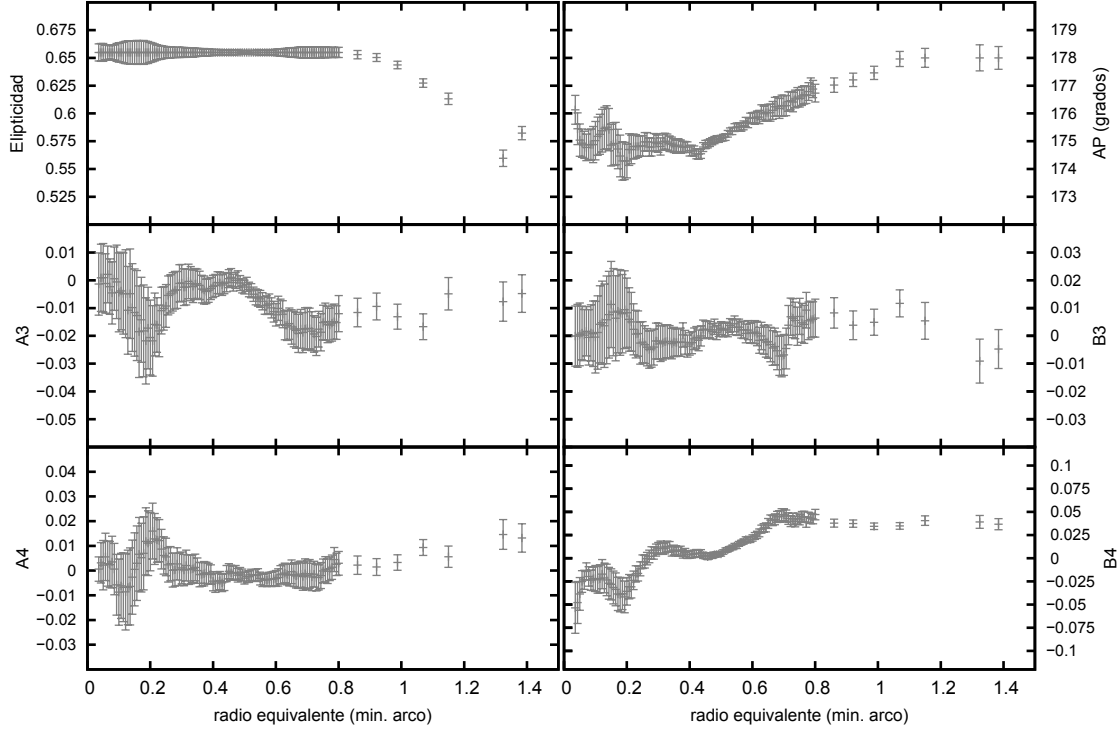


FIGURA 6.2: Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 2549. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, se muestra la elipticidad, ángulo de posición de las isofotas, y los coeficientes de Fourier A_3, B_3, A_4, B_4 , respectivamente.

a diferencia de estas últimas los anillos presentan una pequeña extensión radial, es en el caso de las galaxias S0 la explicación más simple. Una posible alternativa sería la presencia de brazos espirales, lo cual es muy raro en galaxias de este tipo (Seifert & Scorza, 1996).

En el panel superior de la Figura 6.3 se muestran las isofotas de NGC 2549. En él se puede apreciar que las isofotas no muestran deformación muy evidente, aunque es posible apreciar el cambio de isofotas “caja” a “disco” en la zona interna. Los residuos obtenidos luego de restar el modelo creado por ELLIPSE sobre la imagen original en el filtro g' (panel central en Fig. 6.3), evidencian las distintas componentes que presenta esta galaxia. En particular, se observan con claridad los residuos en forma de excesos de luz dejados por el modelo en las posiciones de los dos posibles anillos (identificados con las letras A y B en la figura). Por su parte, el mapa de color ($g' - i'$) (panel inferior en Fig. 6.3) se ve muy regular, sin evidencias obvias de polvo. Sin embargo, es de destacar el notable gradiente sobre el disco, y que el color en la zona más interna alcanza valores significativamente altos como 1.23 mag. De la misma forma, se destaca el hecho de que las zonas donde parece dominar la componente de anillo más externa, resulta también significativamente roja. Esto estaría indicando que dichos anillos están constituidos básicamente por una población estelar vieja. En cuanto al origen de las estructuras de anillos en discos estelares, existen dos escenarios que han sido los más

aceptados hasta la fecha. Uno de ellos es lo que se denomina “anillos de resonancia”, los cuales se producen por fenómenos dinámicos internos del disco y la barra en galaxias, y los “anillos de impacto”, los cuales se producen por el impacto vertical (perpendicular al disco). NGC 2549 no presenta una barra, por lo cual el primer escenario no parece aplicable. Por otro lado, la estructura tan regular de esta galaxia, tampoco indica que la misma haya sufrido un impacto vertical. Sin embargo, existe en la actualidad una tercera opción, la cual implica acreción de gas de galaxias vecinas mediante interacciones de marea, o a través de filamentos cosmológicos durante el ensamble jerárquico de la materia (Kostiuk & Sil’chenko, 2015).

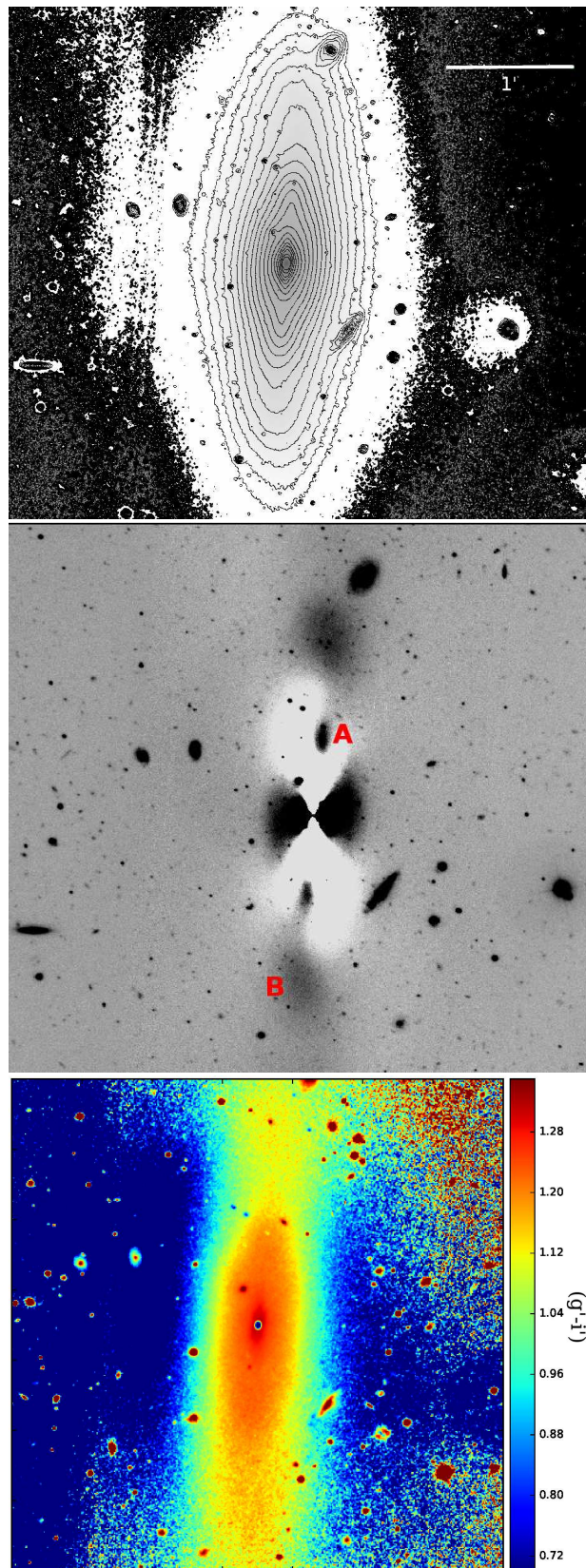


FIGURA 6.3: Panel superior: isofotas superpuestas sobre la imagen g' de NGC 2549. La isofota más interna corresponde a $\mu_g = 16.6$ mag/seg. arco², mientras que la más externa y débil a $\mu_g = 24.6$ mag/seg. arco². El espaciamiento entre isofotas es de 0.48 mag/seg. arco². Panel central: imagen residual en el filtro g' obtenida de la resta del modelo creado por ELLIPSE y BMODEL. Panel inferior: mapa de color $(g' - i')$ de NGC 2549. La orientación de las figuras corresponde al Norte hacia arriba, y el Este hacia la izquierda.

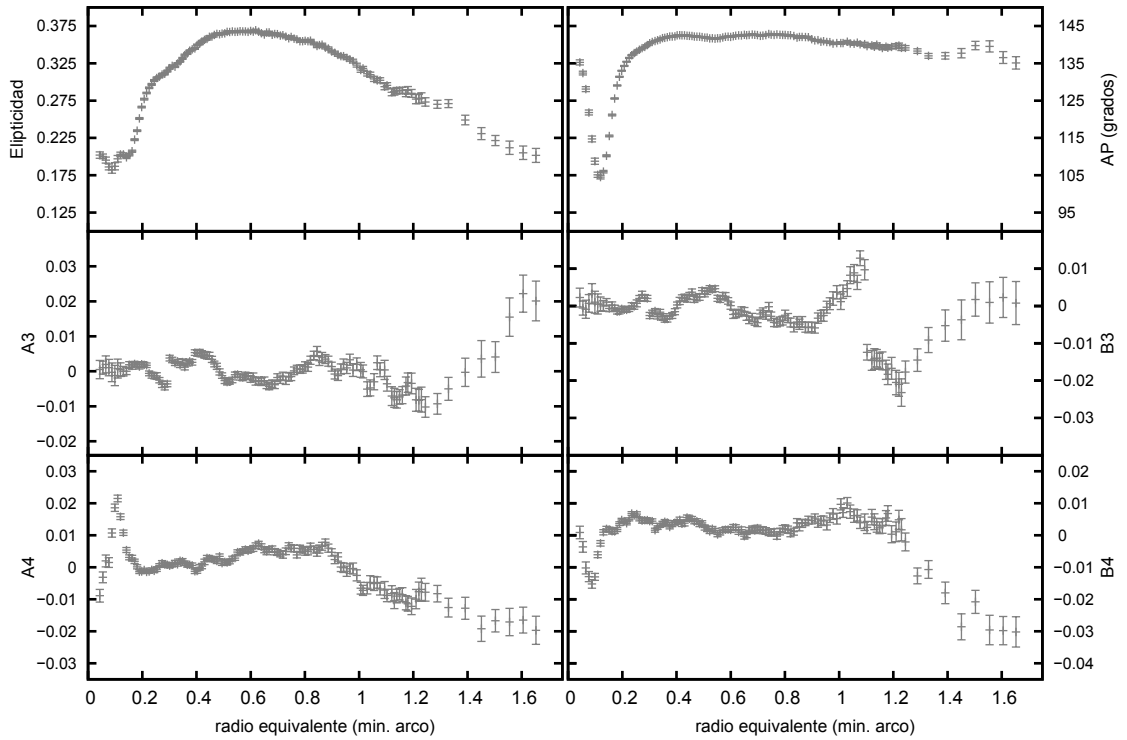


FIGURA 6.4: Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 2880.

NGC 2880: esta galaxia presenta una clara variación en el AP hacia la zona central. La Figura 6.4 muestra que el AP se mantiene prácticamente constante para r_{eq} mayores a 0.2 minutos de arco, mientras que en la zona interior a dicho radio, el mismo muestra una fuerte variación pasando de 135° a 105° , para luego retornar nuevamente a valores próximos a 135° . Por su parte, la e muestra también una variación significativa, aunque mucho más suave y gradual que el AP . Sin embargo, dentro de $r_{eq} = 0.2$ minutos de arco, también muestra un comportamiento particular. Allí, a diferencia de lo que ocurre con el AP , la e se mantiene constante. Este comportamiento en el ángulo de posición y la e es producido, probablemente, por la presencia de una barra débil. Las variaciones aquí mencionadas en los parámetros geométricos fueron intuitas previamente por Elmegreen et al. (1996), quienes utilizaron placas fotográficas en la banda B . El aumento de la e por fuera de la barra (de 0.2 a 0.37), indicaría la presencia de un disco externo rodeado de un halo luminoso (Michard & Marchal, 1993). En cuanto al parámetro B_4 , el mismo muestra que las isofotas son de tipo “disco” hasta $r_{eq} = 1.2$ minutos de arco, a excepción de la zona donde encuentra la mencionada barra (donde B_4 se torna negativo), y donde también varía fuertemente el parámetro A_4 . En la zona externa, se observan también isofotas tipo “caja”, aunque allí es difícil asegurar que las estrellas brillantes del campo no estén influenciando dichos resultados. Lo mencionado anteriormente en referencia a la Fig. 6.4, resulta perfectamente visible en el panel superior de la Figura 6.5, en donde se aprecia la rotación de las isofotas y la variación de la elipticidad.

En la imagen residual (panel central en Fig. 6.5), se observa hacia la región central, una estructura en forma de cruz originada por la resta del modelo, en la cual se encuentra la mencionada barra débil. Por fuera de la misma se aprecia una estructura espiral o de anillo y diferentes subestructuras difusas hacia las regiones más externas (dichas estructuras se encuentran marcadas con las letras *A*, *B*, *C* y *D*, respectivamente). En el caso del mapa de color ($g' - i'$) (panel inferior en Fig. 6.5), no se evidencian regiones de polvo, aunque es notable el gradiente de color de la galaxia. Las estructuras de bajo brillo superficial, así como también el hecho de que la zona externa de esta galaxia muestra cierta similitud con lo encontrado en NGC 6861 (ver más adelante en este mismo capítulo), indica que, como en aquel caso, esta galaxia ha experimentado algún tipo de interacción o evento de fusión menor. Esto resulta notable, ya que a diferencia de la galaxia mencionada, NGC 2880 se encuentra en un ambiente de baja densidad, sin compañeros evidentes.

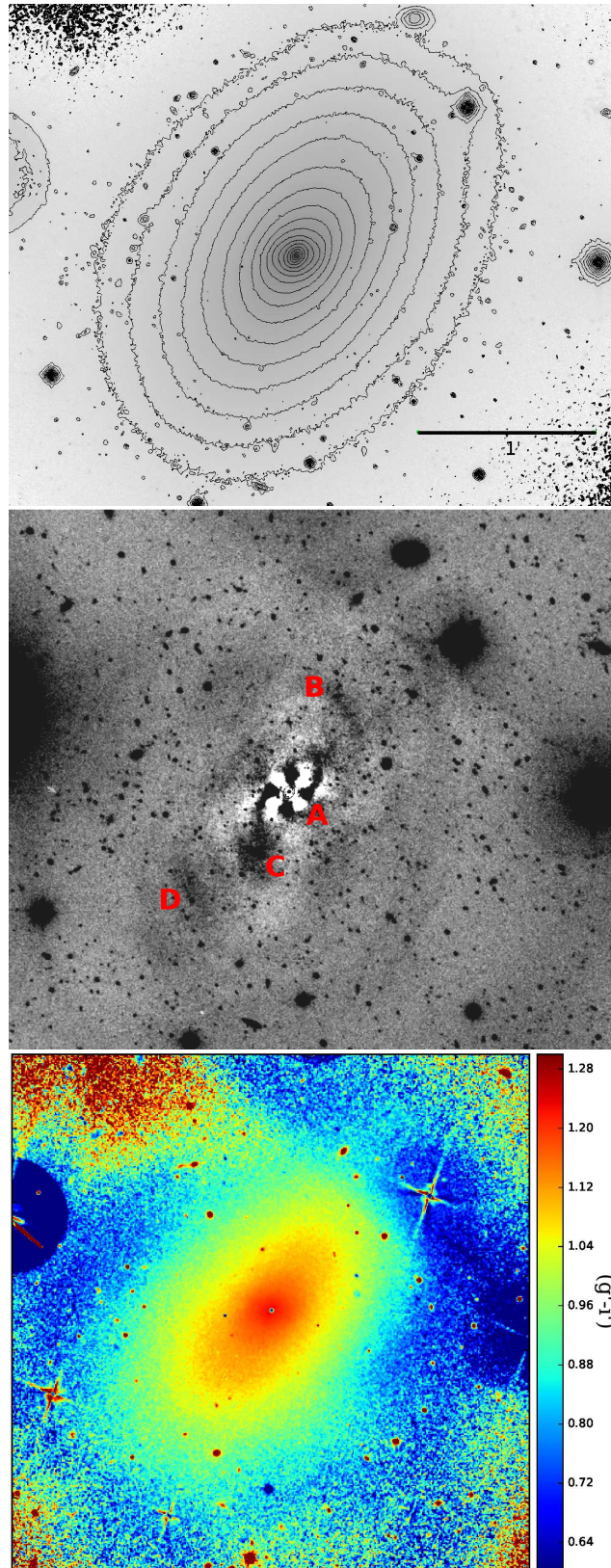


FIGURA 6.5: Panel superior: isofotas superpuestas sobre la imagen g' de NGC 2880. La isofota más interna corresponde a $\mu_g = 16.47$ mag/seg. arco², mientras que la más externa y débil a $\mu_g = 24.45$ mag/seg. arco². El espaciamiento entre isofotas es de 0.41 mag/seg. arco². Panel central: imagen residual obtenida de la resta del modelo, donde se observa la barra (A) y distintas subestructuras de bajo brillo (B, C y D). Panel inferior: mapa de color $(g' - i')$ de NGC 2880. La orientación de las figuras corresponde al Norte hacia arriba, y el Este hacia la izquierda.

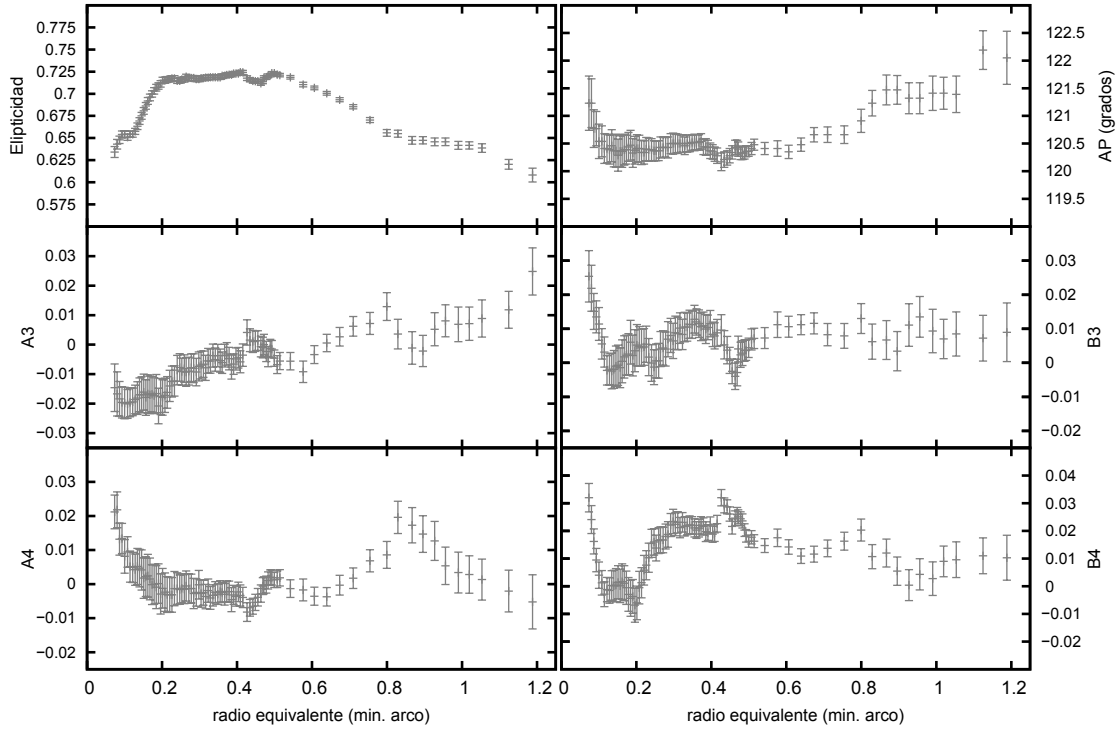


FIGURA 6.6: Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 2612.

NGC 2612: esta galaxia, básicamente dominada por su disco, no muestra variaciones importantes en sus parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico. La Figura 6.6) muestra que en la zona central ($r_{\text{eq}} < 0.3$ minutos de arco), los términos B_3 , A_4 y B_4 presentan pequeñas fluctuaciones. Los dos primeros coeficientes se caracterizan por ser sensibles a la presencia de polvo (Peletier et al., 1990), mientras que B_4 , como se mencionó anteriormente, puede dar indicios de procesos de interacción o fusiones recientes. Particularmente, B_4 es positivo en toda la zona medida (isofotas tipo “disco”), a excepción de un pequeño rango de r_{eq} alrededor de 0.2 minutos de arco, donde resulta negativo (isofotas tipo “caja”). La misma figura muestra que la elipticidad también presenta una variación en la zona interna de la galaxia, aunque de tan solo algunas centésimas.

En el panel superior de la Figura 6.7 se muestra el comportamiento de las isofotas. Al restar a la imagen original el modelo creado por la tarea BMODEL (panel central en Fig. 6.7), se observan estructuras de polvo (indicadas con las letras A y B) que cruzan en forma perpendicular al disco de NGC 2612, del lado Noroeste del mismo. Dichas estructuras se observan con claridad en el mapa de color ($g' - i'$) (panel inferior en Fig. 6.7), además de un leve gradiente de color sobre el disco. Dada la disposición tan asimétrica de las estructuras de polvo en esta galaxia, resulta natural suponer que el origen del mismo es externo. Ello significa que NGC 2612 ha sufrido un proceso de fusión con un satélite de menor masa, o bien, ha acreetado una nube de gas y polvo del

medio intergaláctico. Estos eventos, justamente son los que usualmente se consideran como los responsables de las estructuras de polvo presentes en galaxias de tipo temprano (Davis et al. 2015, y referencias allí mencionadas). Es notable también el fuerte efecto que producen en dicho mapa dos o tres estrellas muy brillantes que afectan una zona extensa del mismo.

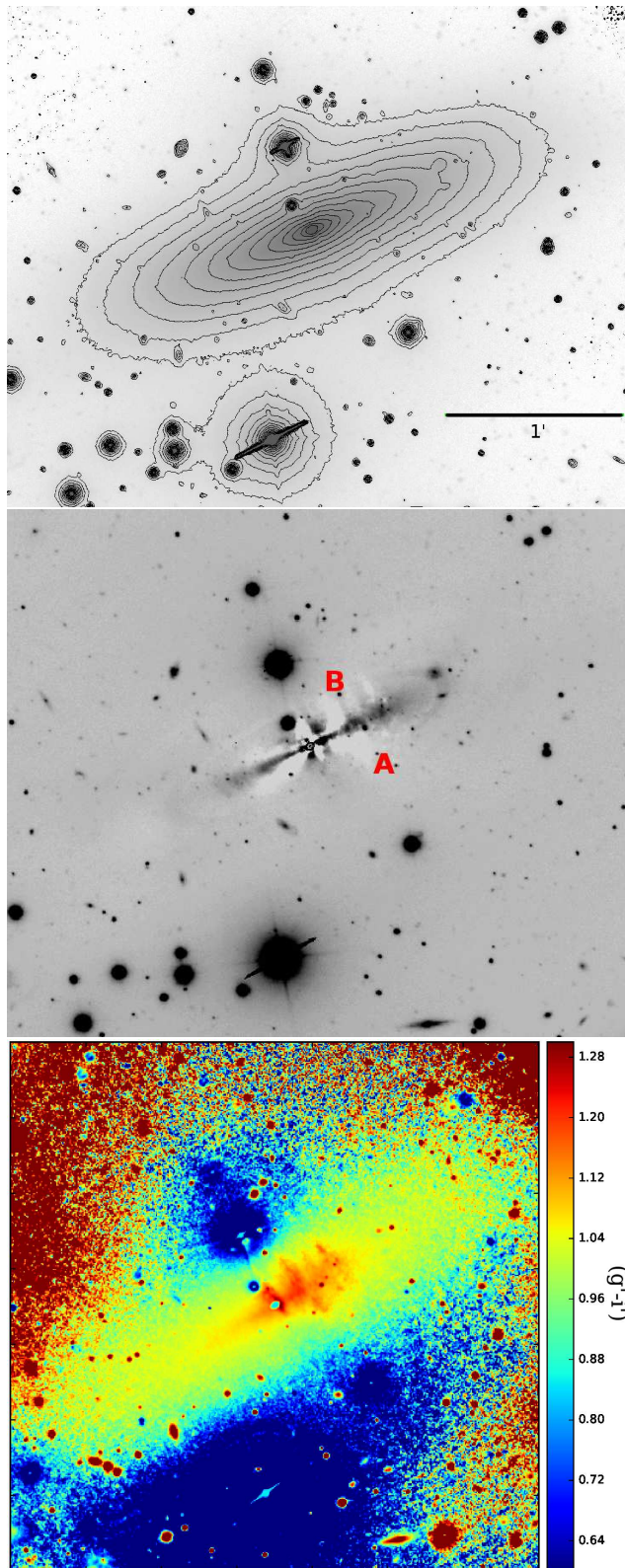


FIGURA 6.7: Panel superior: isofotas superpuestas sobre la imagen g' de NGC 2612. La isofota más interna corresponde a $\mu_g = 18.1$ mag/seg. arco², mientras que la más externa y débil a $\mu_g = 24.2$ mag/seg. arco². El espaciamiento entre isofotas es de 0.55 mag/seg. arco². Panel central: imagen residual en el filtro g' obtenida luego de la resta del modelo, donde se observan las estructuras de polvo (A y B). Panel inferior: mapa de color $(g' - i')$ de NGC 2612. La orientación de las figuras corresponde al Norte hacia arriba, y el Este hacia la izquierda.

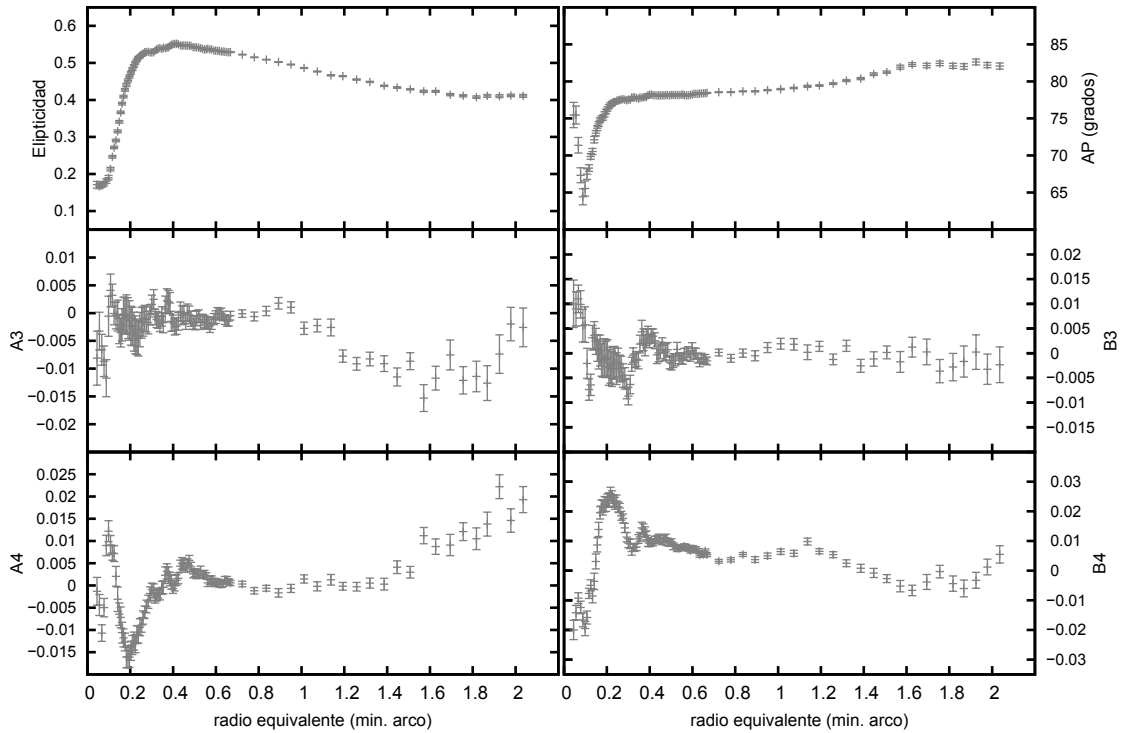


FIGURA 6.8: Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 4546

NGC 4546: al igual que sucede en el caso de NGC 2880, el ajuste de las isofotas en la región central de NGC 4546 presenta una fuerte variación en el AP cambiando $\sim 20^\circ$ en $r_{eq} < 0.2$ (Figura 6.8). Dicha variación también se ve reflejada en la e , la cual pasa de ~ 0.15 a 0.5 en un pequeño rango de distancia galactocéntrica. Estos cambios en las isofotas se deben, posiblemente, a la presencia de una barra interna en esta galaxia. Dentro del radio mencionado anteriormente, el parámetro B_4 indica justamente isofotas tipo “caja”, para luego cambiar a tipo “disco”. Al observar el comportamiento de los restantes términos de Fourier (A_3 , B_3 , A_4), se aprecia que los mismos presentan un “ruido” significativo en la región central. El mapa de color ($g' - i'$) (panel inferior en Figura 6.9) de esta galaxia, revela la existencia de notables estructuras de polvo, ubicándose en forma asimétrica a lo largo del semieje mayor de NGC 4546. El origen de tal estructura de polvo puede estar relacionada con un evento de fusión con un objeto rico en gas, y de menor masa que la propia galaxia. Como veremos en el Capítulo 14 la presencia de una UCD reportada por Norris et al. (2015), y señalada con un círculo rojo en el panel central de la Fig. 6.9, puede tener relación con tal evento. Se volverá sobre este aspecto en la mencionada sección. Además del ya mencionado polvo, el mapa de color indica un gradiente de color muy suave en esta galaxia. La imagen residual del modelo obtenido por ELLIPSE (panel central en Fig. 6.9), como se mencionó anteriormente, muestra varias estructuras irregulares que evidencian el polvo que presenta NGC 4546, el cual resulta incapaz de ser modelado adecuadamente por dicho software.

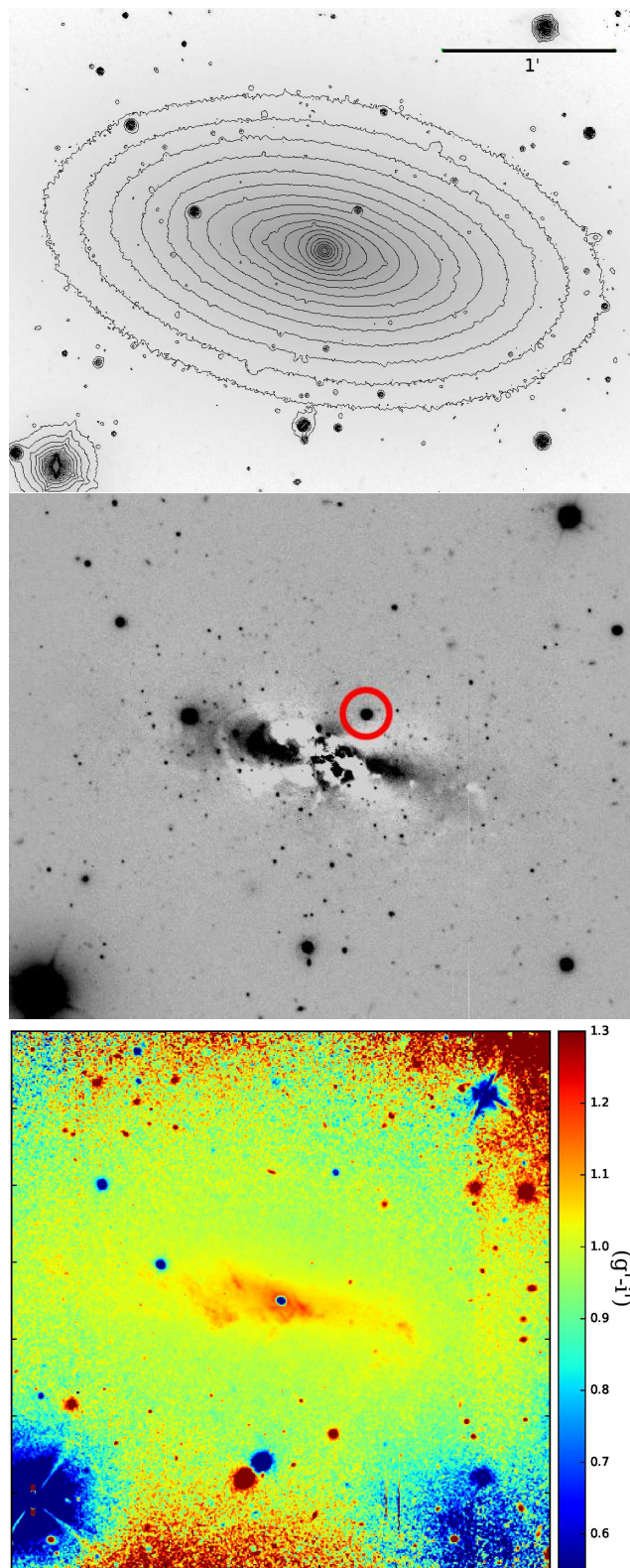


FIGURA 6.9: Panel superior: isofotas superpuestas sobre la imagen g' de NGC 4546. La isofota más interna corresponde a $\mu_g = 15.8$ mag/seg. arco², mientras que la más externa y débil a $\mu_g = 23.2$ mag/seg. arco². El espaciamiento entre isofotas es de 0.41 mag/seg. arco². Panel central: imagen residual obtenida de la resta del modelo sobre la imagen g' . El círculo rojo muestra la ubicación de la UCD reportada por Norris et al. (2015). Panel inferior: mapa de color $(g' - i')$ donde se observa la presencia del polvo.

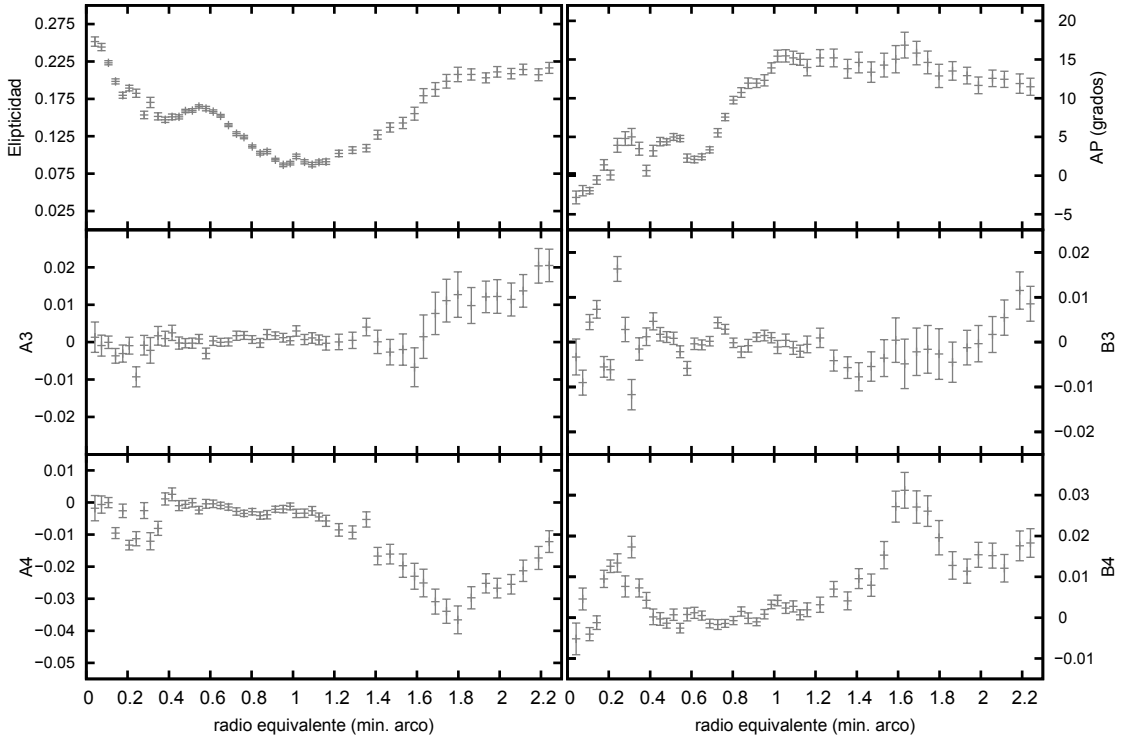


FIGURA 6.10: Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 3414

NGC 3414: no resulta fácil realizar el ajuste de isofotas en esta galaxia, a causa de su apariencia particular, debida a la presencia de polvo rodeando la región central, y la fuerte asimetría que presenta. En el panel superior de la Figura 6.11 se observa la variación que muestran las isofotas sobre la imagen g' . Al visualizar el mapa de color ($g' - i'$) (panel inferior en Fig. 6.11), se aprecia la compleja estructura de polvo en forma de remolino o estructura espiral. Los parámetros obtenidos (Figura 6.10) muestran que a partir de $r_{\text{eq}} \sim 1$ minutos de arco, el AP de las isofotas permanece constante, dominando el disco externo en la misma, el cual parece ofrecer una vista *face-on*. Hacia radios galactocéntricos menores, se observa en la e un claro máximo en $r_{\text{eq}} \sim 0.6$ minutos de arco, debido posiblemente a la presencia de una barra. Los valores obtenidos en este estudio se encuentran acordes con aquellos estimados en el trabajo de Sil'chenko et al. (2012). Dichos autores consideran un modelo con un bulbo central ($R_{\text{gal}} < 15''$), un disco interno ($R_{\text{gal}} = 20 - 70''$), y un disco externo ($R_{\text{gal}} > 85''$). Sin embargo, Laurikainen et al. (2010) describen esta galaxia como una S0 dominada por el bulbo, con un disco muy débil que estaríamos viendo casi de perfil. Por su parte, de Vaucouleurs et al. (1976) reportan, además, una débil barra y también propusieron que NGC 3414 es una galaxia S0 vista de perfil.

Al restar el modelo creado por BMODEL a la imagen original (panel central en Fig. 6.11), se observa la estructura de una probable barra o disco perpendicular al remolino de polvo, además de estructuras de cáscaras (*shells*) en lados opuestos de la misma

ubicadas a una distancia de $r_{\text{eq}} \sim 1.7$ minutos de arco (letras A y B , respectivamente). El efecto de estas subestructuras es visible en los términos de Fourier, principalmente en B_4 , mostrando un claro máximo en la posición antes mencionada. Cabe destacar que la presencia de estructuras de cáscaras es usualmente interpretada como evidencias de que la galaxia en cuestión ha experimentado un evento de fusión menor en los últimos miles de millones de años. En general, dicha estructura es además evidencia de que no hubo una cantidad significativa de gas en juego durante dicho evento. Por el contrario, la estructura de polvo asimétrica en forma de remolino que es claramente visible en el mapa de color, podría estar indicado la acreción o fusión de alguna galaxia menor rica en gas. En cualquiera de los casos, es claro que NGC 3414 ha experimentado un evento que la ha transformado significativamente. En particular, esta galaxia es el objeto central de su grupo, y existen en su vecindad por lo menos dos galaxias más. Por ello, no sería ilógico pensar en un evento de interacción y/o fusión.

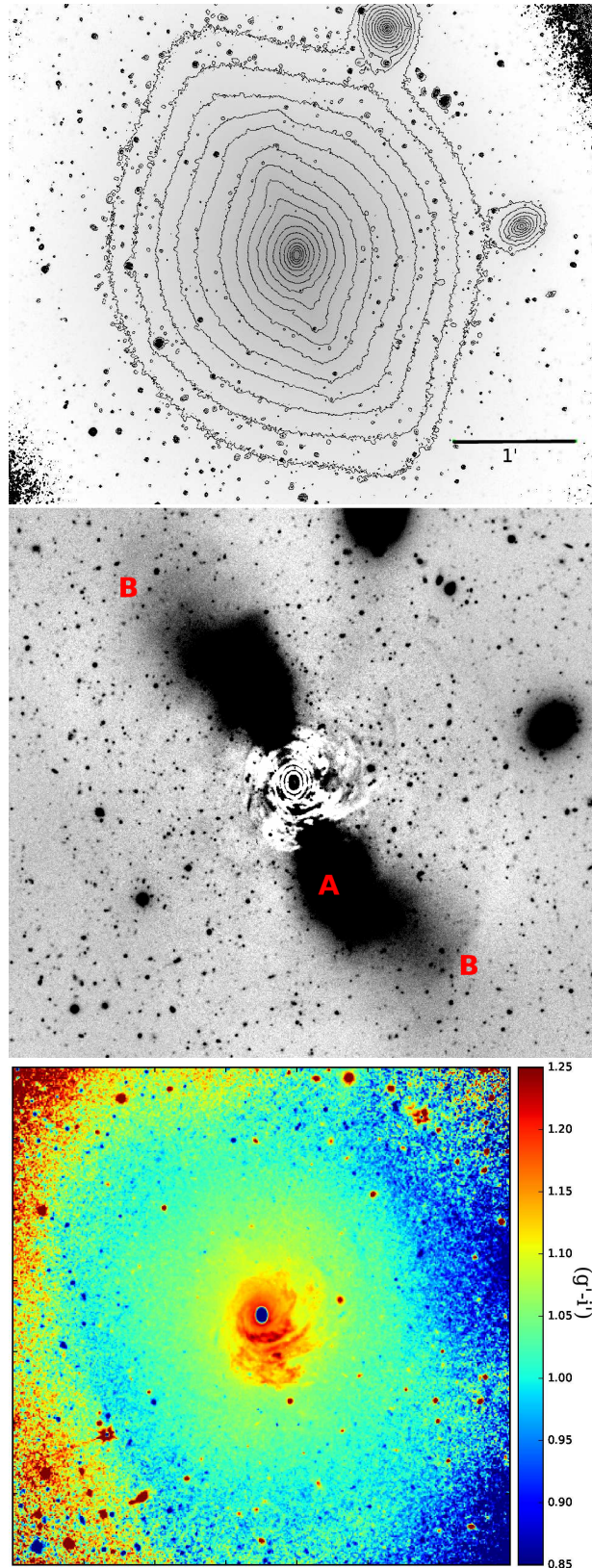


FIGURA 6.11: Panel superior: isofotas superpuestas sobre la imagen g' de NGC 3414. La isofota más interna corresponde a $\mu_g = 17.68$ mag/seg. arco², mientras que la más externa y débil a $\mu_g = 24.7$ mag/seg. arco². El espaciamiento entre isofotas es de 0.41 mag/seg. arco². Panel central: imagen residual obtenida de la resta del modelo, donde se observa la probable barra y estructuras de cáscaras (A , B) hacia los extremos de la misma. Panel inferior: mapa de color $(g' - i')$ de la región central. La orientación de las figuras corresponde al Norte hacia arriba, y el Este hacia la izquierda.

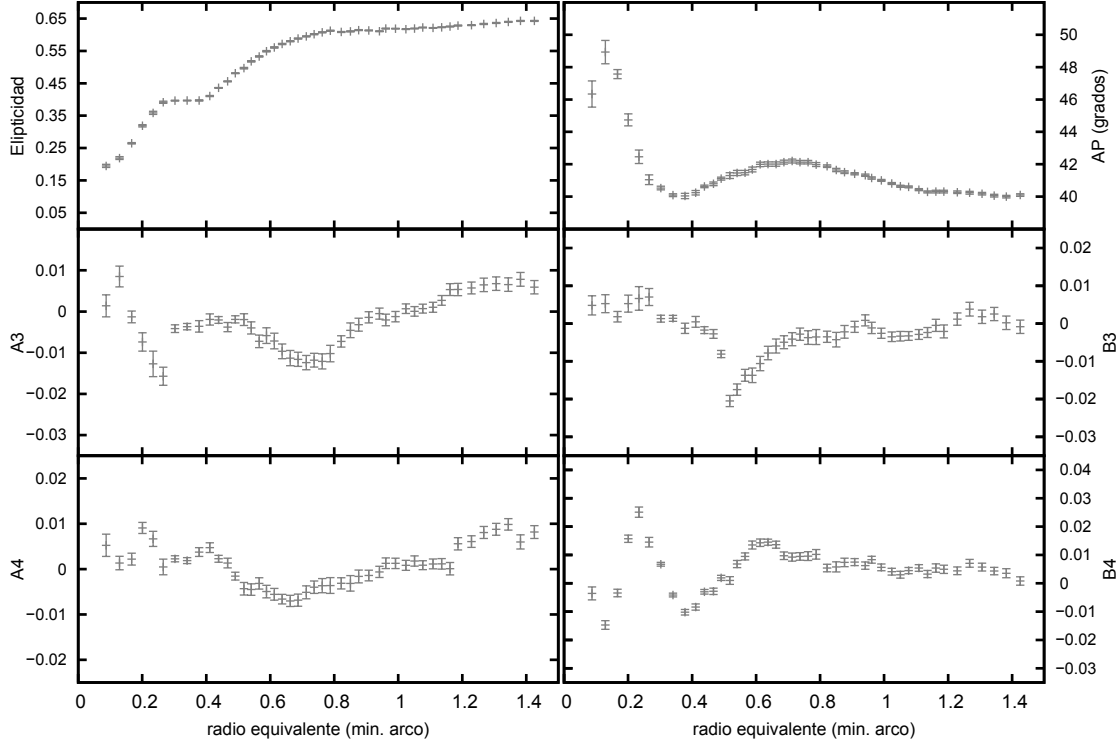


FIGURA 6.12: Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 5838

NGC 5838: en esta galaxia se pueden observar grandes variaciones en los parámetros isofotales (Figura 6.12), principalmente en la región central de la misma ($r_{\text{eq}} < 0.6$ minutos de arco). El comportamiento presentado por las isofotas puede verse en el panel superior de la Figura 6.13. Dentro del radio mencionado anteriormente, tanto la e , AP y B_4 varían significativamente. En particular, B_4 cambia su signo repetidas veces. Ravindranath et al. (2001) utilizando imágenes de alta resolución en la banda H mediante el instrumento NICMOS2 ($19.2'' \times 19.2''$) del telescopio espacial Hubble, observan dos anillos de polvo, ubicados a ~ 0.3 y ~ 2 segundos de arco, rodeando el núcleo de la galaxia. En dicho trabajo se puede observar el ajuste de las isofotas en la región más central, lo cual no es posible de realizar a partir de nuestras imágenes GMOS. El más externo de estos anillos, se vuelve visible al analizar la zona central del mapa de color ($g' - i'$) (panel inferior en Fig. 6.13). Por otro lado, el panel central de la Fig. 6.13, muestra el residuo obtenido al restar el modelo creado por BMODEL sobre la imagen original. Se observan las estructuras complejas que presenta esta galaxia, como el anillo de polvo más externo mencionado anteriormente (indicado con la letra A), y excesos de luz hacia las zonas más externas de la galaxia en $r_{\text{eq}} \sim 0.25$, $r_{\text{eq}} \sim 0.6$ y $r_{\text{eq}} \sim 1.2$ minutos de arco (los cuales se indican con las letras B , C y D , respectivamente). Debido a los residuos obvios que se obtienen al restar el modelo, se utilizó el método denominado *unsharp-mask*, con el objetivo de visualizar claramente las subestructuras mencionadas, así como otras que pudieran presentarse en NGC 5838. Dicha técnica consiste en suavizar la imagen convolucionándola con una gaussiana y dividiendo la misma sobre la imagen

original. Se utilizaron aquí conjuntamente dos gaussianas de $\sigma = 9$ y $\sigma = 23$ píxeles, para observar en mayor detalle las diferentes estructuras. La Figura 6.14 muestra claramente la presencia de las regiones mencionadas anteriormente (B , C y D), las cuales podrían ser anillos estelares y/o restos tenues de una posible estructura espiral o un objeto de baja masa destruido. Por último, el mapa de color no muestra evidencias de polvo más allá de la región central ($r_{\text{eq}} < 0.1$ minutos de arco), aunque resulta notable la asimetría en el color del disco.

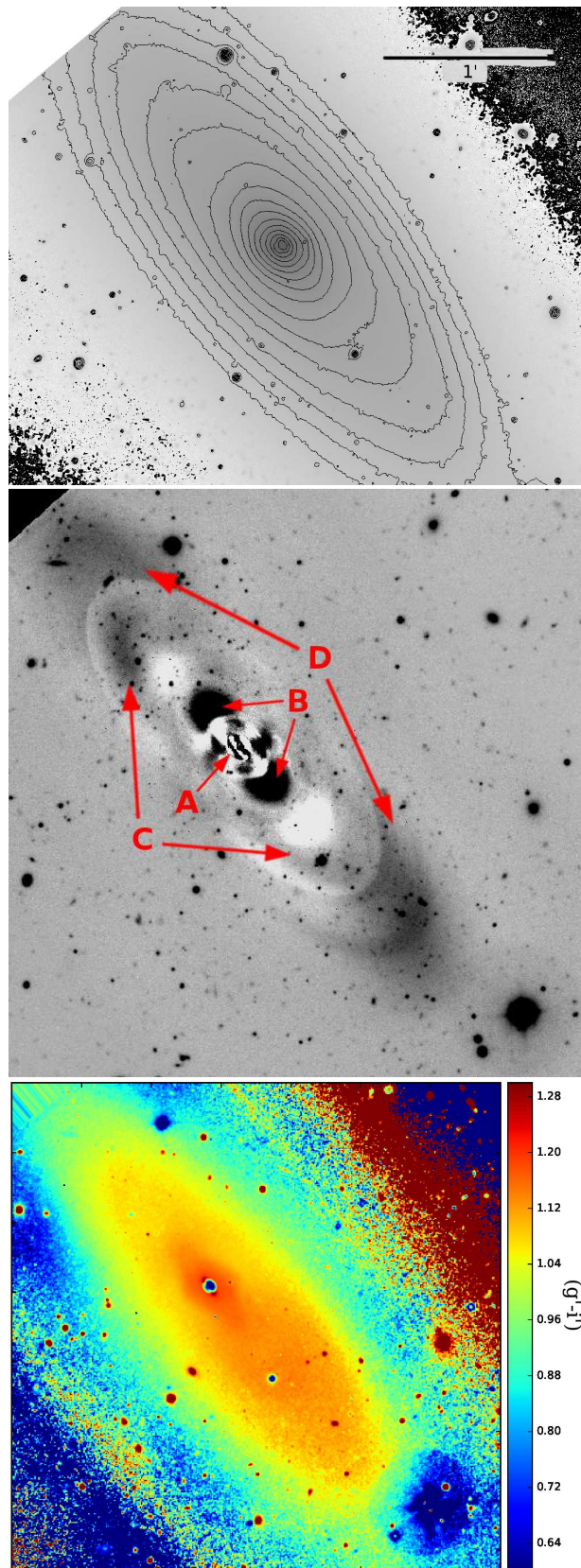


FIGURA 6.13: Panel superior: isofotas superpuestas sobre la imagen g' de NGC 5838. La isofota más interna corresponde a $\mu_g = 16.87$ mag/seg. arco², mientras que la más externa y débil a $\mu_g = 23.65$ mag/seg. arco². El espaciamento entre isofotas es de 0.55 mag/seg. arco². Panel central: imagen residual de NGC 5838 luego de la resta del modelo creado por ELLIPSE y BMODEL. Las letras A , B , C y D indican el anillo de polvo interno, así como las diferentes subestructuras de bajo brillo mencionadas en el texto. Panel inferior: mapa de color $(g' - i')$ de la región central de NGC 5838.

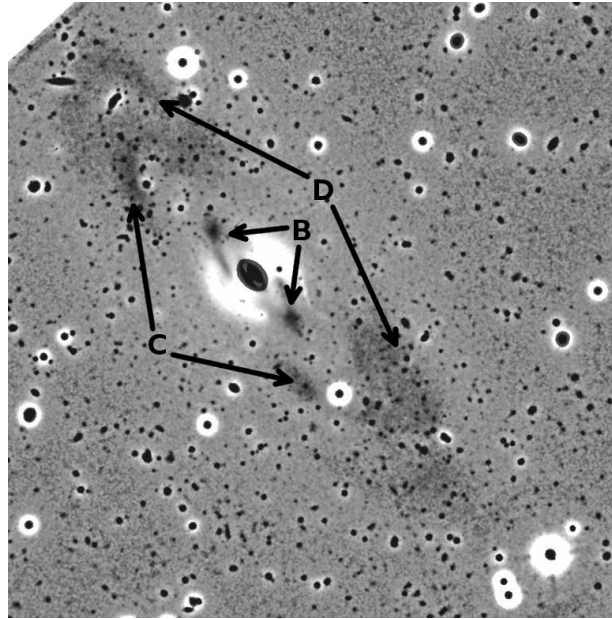


FIGURA 6.14: Imagen g' de NGC 5838 obtenida mediante el método *unsharp-mask*. Las diferentes subestructuras tenues alrededor de NGC 5838 se indican con las letras B , C y D .

NGC 6861: el análisis isofotal de esta galaxia presenta varias peculiaridades. Se observa una fuerte variación tanto en la e como en el AP , experimentando un cambio de 0.46 a 0.2 dentro de 100 segundos de arco, y una diferencia de $\sim 44^\circ$ entre la zona más interna y el radio anteriormente mencionado (Figura 6.15). Esto último se observa claramente en el panel superior de la Figura 6.16, donde las isofotas no concéntricas presentan una deformación hacia el noroeste. La disminución de la elipticidad es también observada en la emisión del gas caliente en rayos-X de $e = 0.4 \pm 0.04$ a 0.19 ± 0.05 para $7.3 < r < 42$ kpc (Machacek et al., 2010). Estos cambios significativos también son detectados en los términos de Fourier (A_3 , B_3 , A_4 , B_4). A grandes radios, el parámetro B_4 cambia su signo mostrando que NGC 6861 presenta isofotas tipo “caja”. Estos resultados se encuentran en buen acuerdo con los obtenidos por Li et al. (2011) presentados en el “*Carnegie-Irvine Galaxy Survey*”.

La variación mostrada por el AP en NGC 6861 fue reportada previamente por Tal et al. (2009). Estos autores mencionan que esta galaxia posee características tidales, presentando emisión intra-grupo e isofotas no circulares. A partir de la tabla obtenida en el ajuste de ELLIPSE, se generó un modelo de la galaxia mediante la tarea BMODEL, el cual fue restado posteriormente a la imagen original (panel central de la Fig. 6.16). Diferentes estructuras quedan en evidencia en NGC 6861, entre las cuales se observa el polvo y disco estelar a $R_{\text{gal}} < 10$ segundos de arco (etiquetado como A en la imagen), una serie de arcos externos (B y C), y dos estructuras de bajo brillo superficial (D y E). Desafortunadamente, D presenta una estrella brillante sobre ella. Todas estas características mencionadas se encuentran alineadas a lo largo del eje mayor de la galaxia.

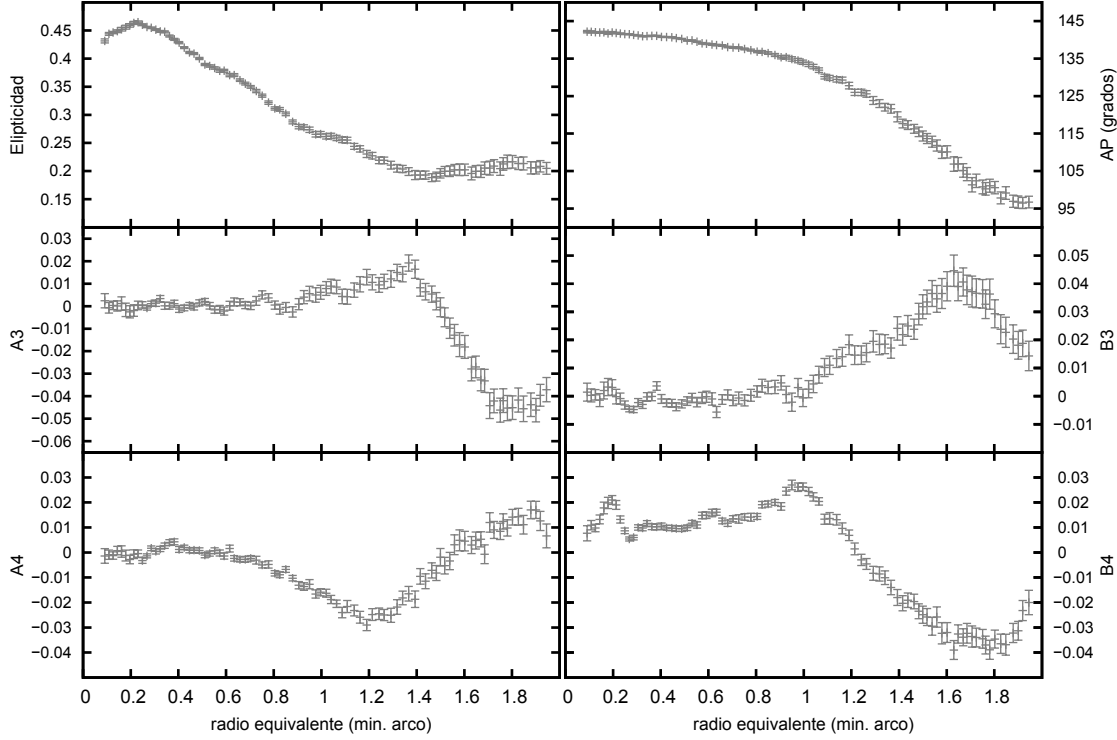


FIGURA 6.15: Parámetros isofotales en función del radio galactocéntrico equivalente para NGC 6861.

En el panel inferior de la Fig. 6.16 se muestra el mapa de color ($g' - i'$) de NGC 6861. En el mismo se aprecia el elevado color alcanzado en la región central (~ 1.2 mag), similar al obtenido en NGC 2549, además del disco de polvo antes mencionado. Son entonces varias las evidencias que apuntan a que NGC 6861 ha experimentado un evento de interacción o fusión con un objeto de menor masa.

Como se ha mostrado en el análisis realizado aquí sobre cada una de las galaxias, todas ellas muestran notables particularidades, exhibiendo subestructuras de bajo brillo superficial y regiones de polvo asimétricas, entre otras. Si bien estas características, posiblemente asociadas a eventos de fusiones y/o interacciones gravitacionales en el pasado con objetos de menor masa (Feldmann et al., 2008), no son raras en galaxias elípticas masivas ubicadas en el campo o grupos (Tal et al., 2009), nuestros resultados muestran que posiblemente lo mismo sea válido para las galaxias S0 en tales ambientes. Ahora bien, si aceptamos que las particularidades expuestas en este capítulo están asociadas a eventos de fusión, resulta natural entonces preguntarnos si los sistemas de CGs pertenecientes a estas galaxias muestran también algún tipo de fenómeno que nos señalen posibles brotes de formación estelar intensa con formación de CGs. O, planteado de otra forma: esos hipotéticos eventos que han alterado las galaxias aquí estudiadas, ¿han dejado alguna huella en sus sistemas de CGs?

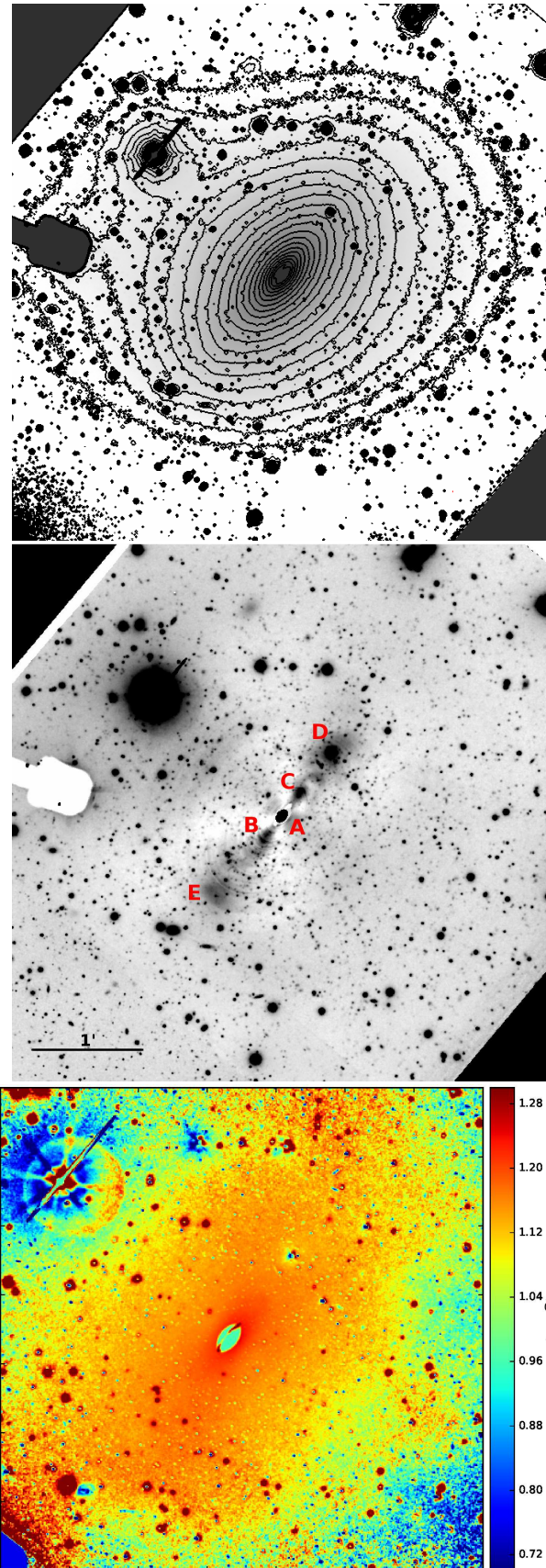


FIGURA 6.16: Panel superior: isofotas r' de NGC 6861. La isofota más débil externa corresponde a $\mu_r = 24.5$ mag/seg. arco², mientras que la más brillante e interna corresponde a $\mu_r = 17.5$ mag/seg. arco². El espaciamiento entre isofotas es de 0.368 mag/seg. arco². Panel central: cociente entre la imagen original en el filtro r' y el modelo. Las diferentes estructuras presentes en NGC 6861 fueron marcadas mediante las letras A a E. Panel inferior: mapa de color $(g' - i')$ de NGC 6861.

Capítulo 7

Selección de candidatos a cúmulos globulares

7.1 Diagramas color-magnitud y color-color

Con el fin de estudiar los sistemas de CGs de cada galaxia de la muestra, analizamos la fotometría de los objetos puntuales en cada catálogo. La calidad obtenida en la fotometría se ve reflejada al visualizar los errores de los colores en función de la magnitud (Figura 7.1). En ellos se aprecia que hasta el límite en completitud escogido en cada caso (ver Tabla 5.4), los errores resultan estar por debajo de 0.11 mag. Una excepción es el caso de NGC 2880, la cual presenta valores ligeramente mayores ($\epsilon(g' - i') \sim 0.13$ mag), debido posiblemente a diferencias de *seeing* entre sus campos (ver Tabla 3.1). Para homogeneizar las diferentes fotometrías, y quedarse con los objetos cuyos errores en los colores sean menores a 0.1 mag, se adoptaron magnitudes límites ligeramente más brillantes que las correspondientes al valor dado por el 80% de la completitud.

La Figura 7.2 muestra los diagramas color-magnitud (DCM) y los diagramas color-color (DCC), de todas las fuentes puntuales medidas en los diferentes campos GMOS de cada galaxia. La línea de trazos horizontal en los DCM indica el límite en el extremo débil de magnitudes correspondiente a errores $\epsilon(g' - i') \sim 0.1$ mag. En dichos diagramas puede apreciarse que los CGs son relativamente fáciles de identificar ya que los mismos se agrupan alrededor de colores específicos, resaltando sobre la secuencia de estrellas de la Vía Láctea. Únicamente en el caso de NGC 2612 resulta difícil identificar la presencia del sistema de CGs, ya que luce muy pobre a priori.

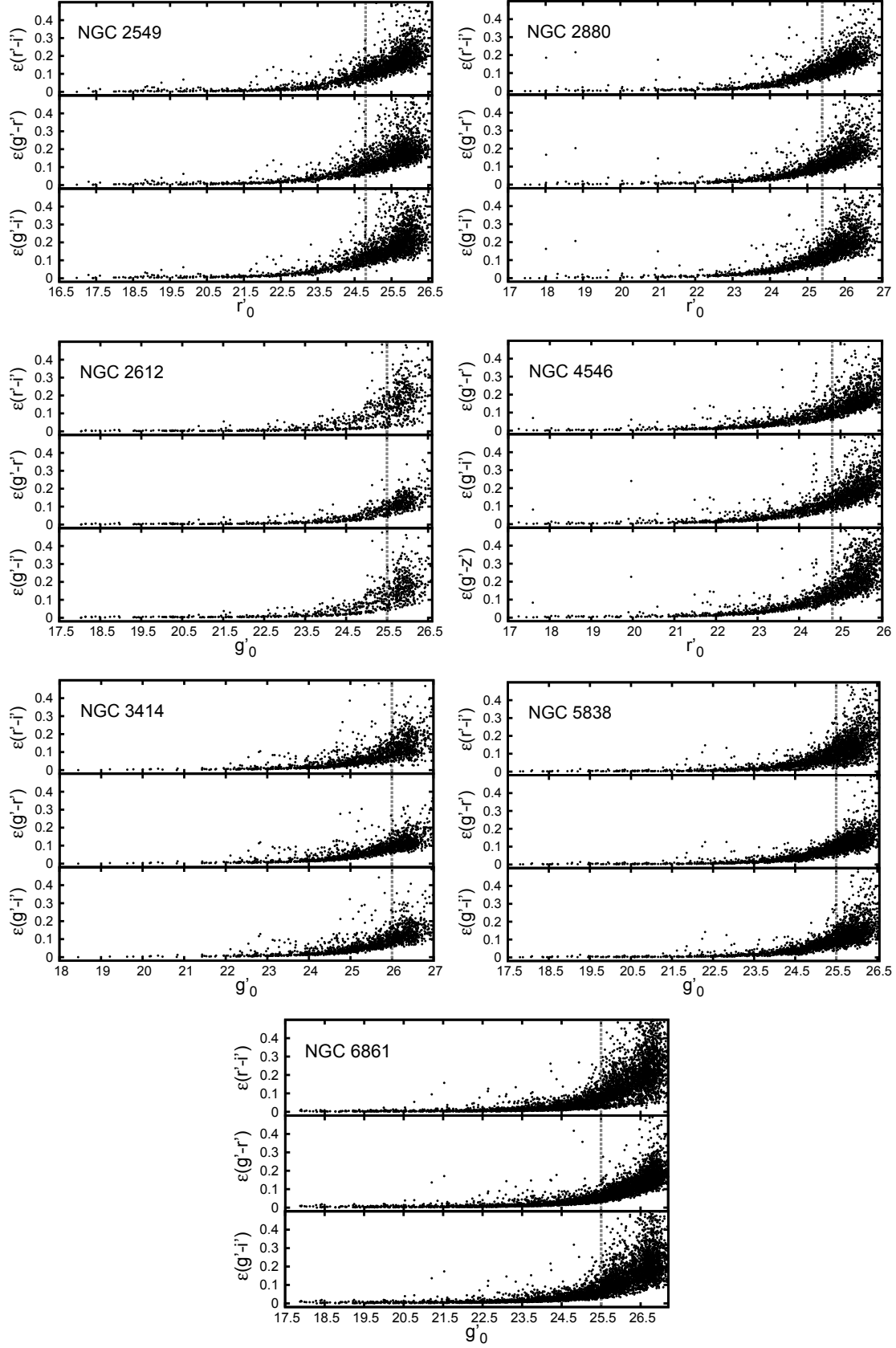


FIGURA 7.1: Errores fotométricos para los diferentes índices de color en función de las magnitudes de referencia utilizada en cada galaxia. La línea de trazos vertical indica la magnitud correspondiente al 80% de completitud. Para una mejor visualización de los errores en NGC 4546 hemos incluido solamente $\epsilon(g' - z')$, $\epsilon(g' - i')$ y $\epsilon(g' - r')$.

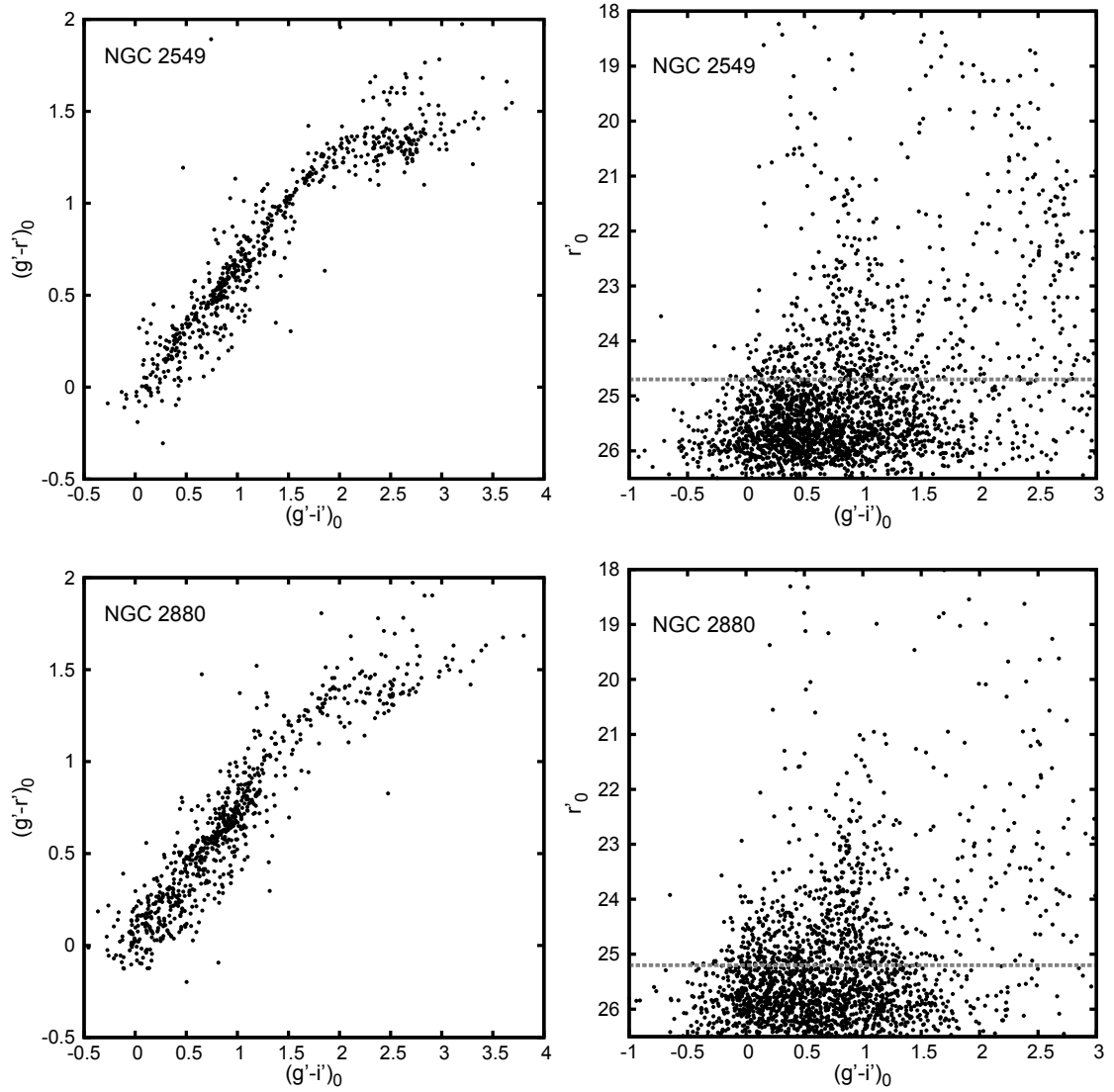


FIGURA 7.2: Paneles izquierdos: Diagramas color-color de los objetos puntuales, con errores $\epsilon(g' - i') < 0.1$ mag (línea de trazos horizontal en diagrama color-magnitud), medidos en los campos de NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861, respectivamente. Paneles derechos: diagramas color-magnitud con los objetos considerados por SExtractor como puntuales.

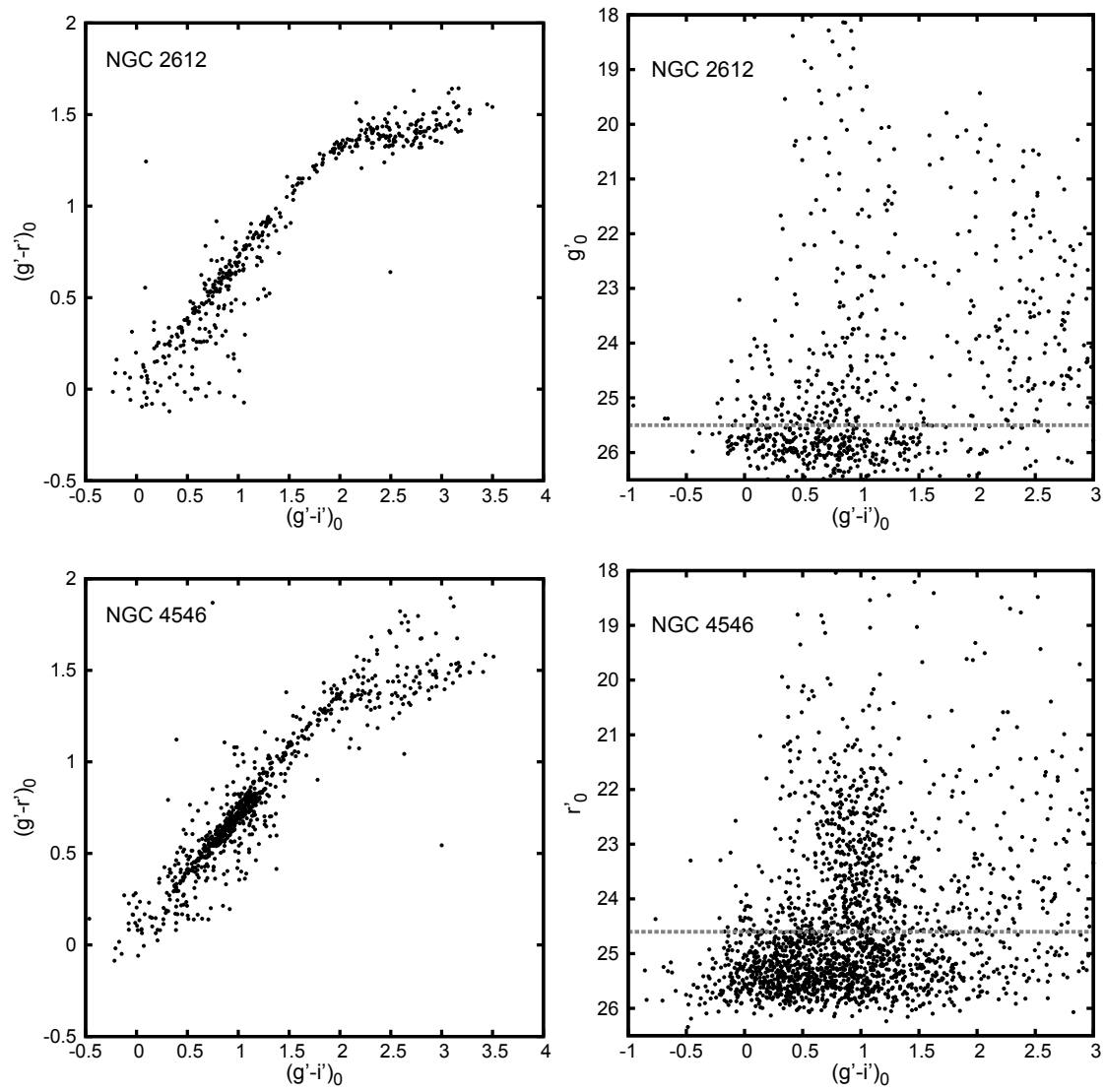


FIGURA 7.2: Continuación

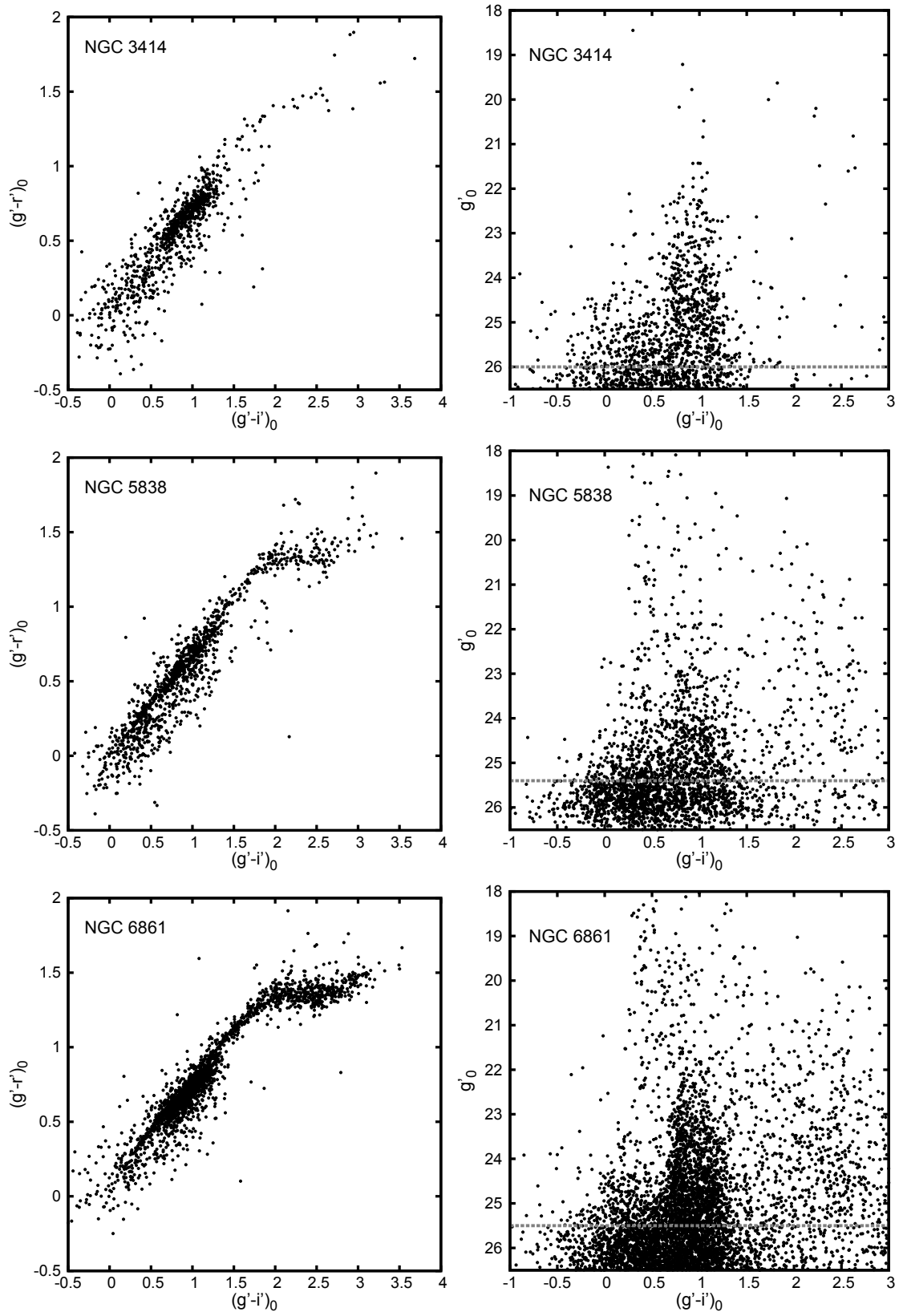


FIGURA 7.2: Continuación.

Para lograr una muestra inicial de candidatos para las distintas galaxias, consideramos rangos amplios de colores típicos para CGs, de manera de incluir la mayor cantidad de candidatos posible. Los rangos de colores escogidos fueron $0.4 < (g' - r')_0 < 1.$, $0. < (r' - i')_0 < 0.7$ y $0.6 < (g' - i')_0 < 1.6$ mag, añadiendo en el caso de NGC 4546, los colores $0.7 < (g' - z')_0 < 1.5$, $0.1 < (r' - z')_0 < 0.75$, y $-0.15 < (i' - z')_0 < 0.4$ mag. Dichos rangos resultan similares a los utilizados por otros autores que han realizado estudios de sistemas de CGs con GMOS (Faifer et al. 2011; Caso et al. 2015), y fueron escogidos con el objeto de disminuir la contaminación por estrellas de la Vía Láctea, así como por objetos no resueltos de fondo. En el extremo brillante, se adoptó un corte en brillo considerando el equivalente a $M_V \sim -11$ (Mieske et al., 2006a), este resulta ser un límite razonable para separar CGs masivos de otros objetos tales como UCDs y estrellas de la Vía Láctea. En la Tabla 7.1 se listan los rangos en magnitud escogidos para cada galaxia considerando los cortes antes mencionados.

Posteriormente, y como último paso antes de quedarse con los candidatos a CGs finales en cada sistema, se realizó una inspección visual sobre las imágenes de los objetos seleccionados, para controlar que no hubieran quedado artefactos o detecciones incorrectas. El número de candidatos en cada caso se presenta en la Tabla 7.1.

Galaxia	Mag.	N _{CG}
NGC 2549	$19.2 < r'_0 < 24.7$	210
NGC 2880	$20.4 < r'_0 < 25.2$	308
NGC 2612	$21.2 < g'_0 < 25.5$	107
NGC 4546	$19.4 < r'_0 < 24.6$	328
NGC 3414	$21.3 < g'_0 < 26.0$	549
NGC 5838	$21.4 < g'_0 < 25.4$	494
NGC 6861	$21.8 < g'_0 < 25.5$	1245

TABLA 7.1: Número final de candidatos a CGs en cada galaxia (N_{CG}), luego de los correspondientes cortes en color y magnitud.

La Figura 7.3, muestra los DCM con los candidatos a CGs de cada galaxia, sobre los cuales se efectuaron los diferentes análisis. Los mismos se encuentran ordenados en forma creciente según la magnitud absoluta de la galaxia anfitriona.

Tal como se mencionó antes, estos diagramas muestran con claridad la presencia de CGs, a excepción del caso de NGC 2612 donde el sistema es claramente pobre. Por otro lado, se destacan la cantidad de candidatos a CGs en NGC 6861, y en NGC 3414. Otro aspecto a destacar es que, a primera vista, ninguno de los sistemas luce claramente bimodal, lo que indica que no estamos en presencia de sistemas similares al de la galaxia NGC 3115 (Faifer et al., 2011). Esto indica también, que no será una tarea sencilla identificar las distintas subpoblaciones típicas de los sistemas de CGs denominadas “azules” y “rojos”. En todos los casos, los diagramas resultan complejos en mayor o menor medida. En el caso particular de NGC 6861, la figura muestra la posible existencia del fenómeno denominado “*blue tilt*”, el cual significa que los CGs azules de dicha galaxia posiblemente

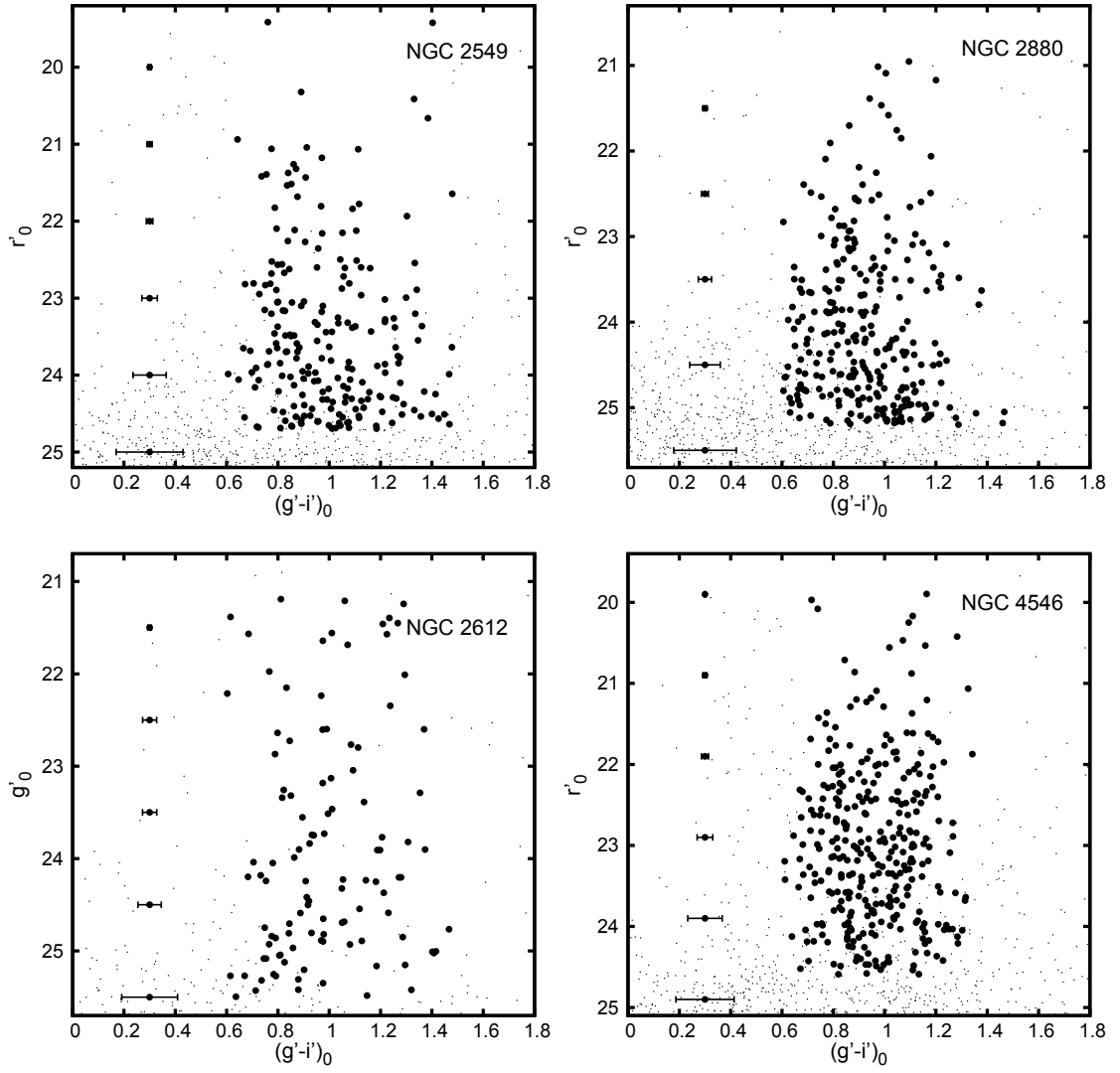


FIGURA 7.3: Diagramas color-magnitud de la muestra final de candidatos a CGs (círculos llenos negros) en NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861, respectivamente.

presenten una relación masa-metalicidad. Se profundizarán varios de estos aspectos en los siguientes capítulos.

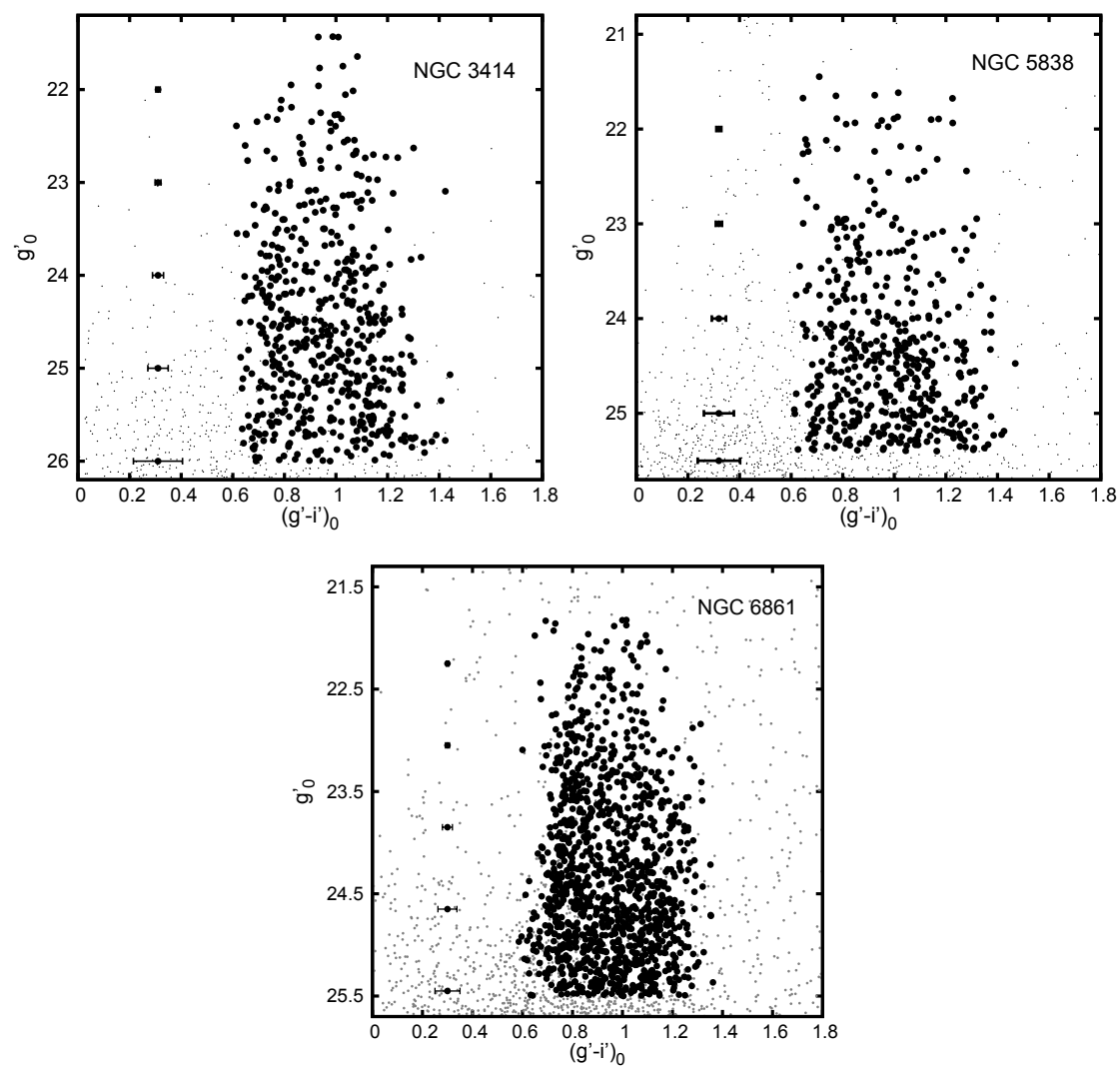


FIGURA 7.3: Continuación.

7.2 Campos de comparación

Más allá de que, como se ha mostrado en diversos trabajos de la literatura (Bridges et al. 2006; Pierce et al. 2006a,b; Faifer et al. 2011), el contar con observaciones en tres o más bandas fotométricas, y bajo buenas condiciones de observación (*seeing* < 1 segundo de arco) permite obtener muestras de CGs significativamente limpias (contaminación < 10% para muestras de sistemas de CGs relativamente ricos, y para $g' < 23$ mag), el efecto de contaminación se intensifica fuertemente hacia el extremo débil. Por otro lado, está claro que aun siendo baja, la contaminación puede tener un efecto importante en aquellos sistemas con pocos CGs.

Las galaxias de fondo y los sistemas estelares no resueltos en general cuyos colores se encuentren en el rango presentado por los CGs (Fukugita et al., 1995), junto con las estrellas de la Vía Láctea que muestran esos mismos colores, conforman las fuentes de contaminación presentes en cualquier estudio fotométrico de sistemas de CGs. La apariencia de las distribuciones de color integrado, y muchas de las conclusiones que podríamos obtener, se verán afectadas si no se considera el efecto de estos objetos antes mencionados. El mecanismo usual para estimar el efecto de los objetos contaminantes es el de observar un campo de control o comparación junto con los datos de ciencia. Dado que la distribución de las estrellas de nuestra galaxia es fuertemente dependiente de la posición galáctica en la que se observa, se requiere que dichos campos se encuentren lo suficientemente próximos angularmente a las galaxias de interés, pero también, lo suficientemente lejos como para que no sea esperable encontrar CGs en los mismos. En cuanto a la contaminación por objetos no resueltos de fondo, su efecto es esperable que sea similar en cualquier dirección del cielo, siempre que el área observada sea lo suficientemente grande.

Dado el tiempo finalmente obtenido para los diferentes programas de observación, solo se pudo obtener un campo de comparación correspondiente a la galaxia NGC 3414. Para el resto de las mismas, se debió buscar en el GSA imágenes en zonas galácticas similares a los campos de ciencia, que hubieran sido observados en los mismos filtros y que fuesen lo suficientemente profundas. Sólo se pudo encontrar un campo GMOS que cumplía con los requisitos antes mencionados, encontrándose relativamente cerca de la galaxia NGC 6861. El mismo forma parte del programa de observación GS-2011A-Q-81 (PI: Gimeno), y se encuentra centrado en el grupo compacto de galaxias NGC 6845 ($RA = 20^h 00^m 58.28^s$, $DEC = -47^d 04^m 11.9^s$).

Se aplicaron los mismos procedimientos descritos en las Secciones 3.2 a 5.3, sobre los campos de comparación antes mencionados, obteniendo catálogos fotométricos calibrados con todos los objetos medidos en ellos. En la Figura 7.4 se muestran los DCM para ambos campos con todas las fuentes catalogadas como puntuales por SExtractor (índice

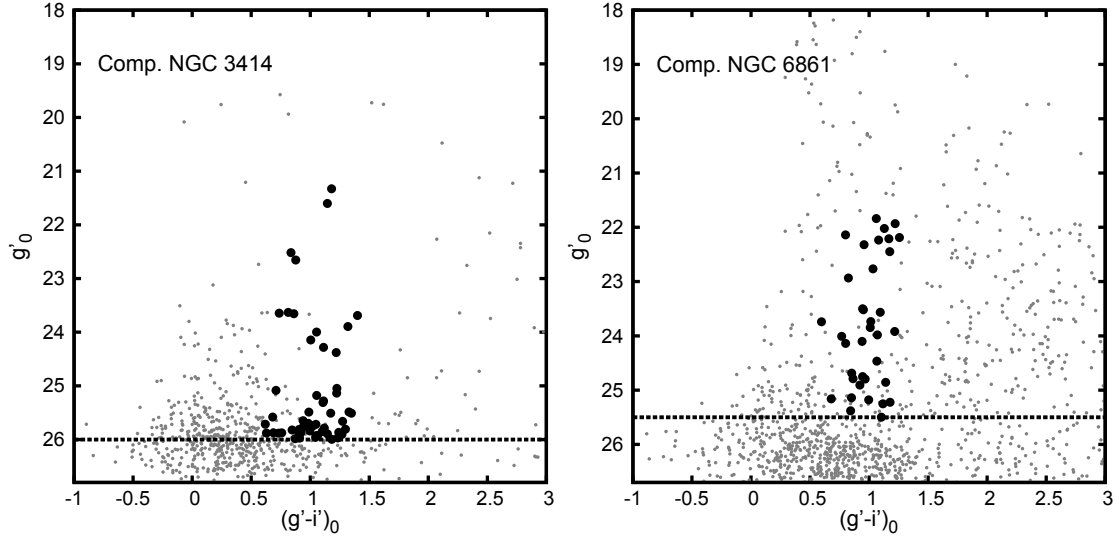


FIGURA 7.4: Diagramas color-magnitud correspondientes a los campos de comparación utilizados para NGC 3414 y NGC 6861. En puntos grises se marcan los objetos puntuales medidos en ambos campos, y con puntos negros aquellos que cumplen con los criterios de corte en color y magnitud utilizados para la selección de CGs. La línea de trazos horizontal indica el valor de magnitud correspondiente al 80% de completitud.

de estelaridad > 0.5), y aquellos que cumplen con los mismos cortes en color y magnitud que los utilizados para los candidatos a CGs (Sección 7.1). En el caso del campo de comparación de NGC 3414, los objetos resultantes presentan una distribución espacial uniforme sobre el mismo. Los experimentos de completitud realizados sobre el filtro g' (Fig. 5.12) muestran que la fotometría para objetos puntuales es completa al 80% para valores de $g'_0 < 26.5$ mag, es decir, resultando 0.5 mag más profunda que la obtenida para el campo de NGC 3414. La cantidad de objetos que sobreviven en este campo de comparación luego de realizado los cortes en color y magnitud, es de 54, lo cual indica que la muestra total de candidatos para esta galaxia incluye alrededor de un 9% de objetos contaminantes.

Para el caso del campo de comparación utilizado en NGC 6861, es importante mencionar que el grupo NGC 6845 está compuesto de cuatro galaxias, todas ellas contenidas dentro del campo de visión de GMOS (Fig. 7.5). Dos de estas galaxias son espirales y las otras dos lenticulares. Ninguna de ellas aparece como significativamente más masiva que las otras, lo cual indica que es poco probable que exista allí una población importante de CGs. Por otro lado, la única estimación de distancia del grupo se basa en el corrimiento al rojo obteniéndose valores de 90 a 100 Mpc (Gordon et al., 2003). Adoptando este rango de distancia y la relación entre las bandas V y g' , dada por Faifer et al. (2011), esperamos que cúmulos masivos como ω Cen presenten magnitudes entre $g'_0 \sim 24.8 - 25.1$. Como primer paso, comprobamos si los CGs pertenecientes a estas galaxias eran detectados en nuestra fotometría. El DCM presentado en el panel derecho de la Fig. 7.4 no muestra ningún agrupamiento de objetos en los rangos típicos de colores de CGs. Realizamos la misma prueba empleando los DCC y los resultados fueron similares. Adicionalmente,

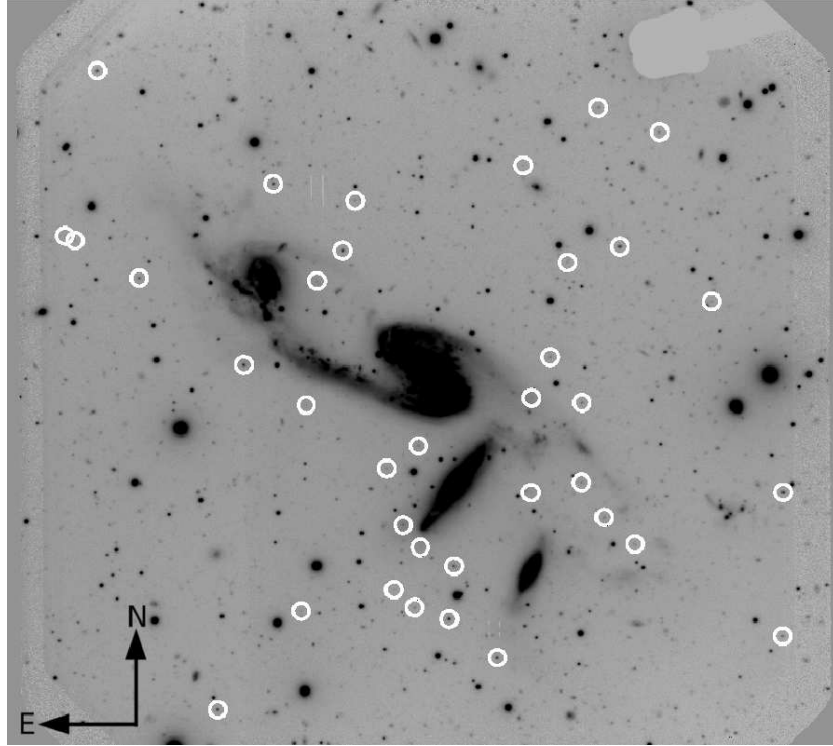


FIGURA 7.5: Distribución espacial sobre el campo de NGC 6845 de los objetos (círculos blancos) que cumplen con los criterios de corte en color y magnitud utilizados para la selección de candidatos a CGs en NGC 6861. Como se indica en el texto, se han excluido aquellos objetos que aparecían muy próximos a las galaxias del grupo, y que podrían ser CGs pertenecientes a las mismas.

graficamos la distribución espacial de fuentes puntuales y solo aquellas con $g'_0 > 24.5$ mag mostraron cierta concentración visual muy marginal hacia las galaxias. Por lo tanto, según lo esperado para la distancia adoptada, algunos de estos objetos débiles en NGC 6845 bien podrían ser CGs pertenecientes a las galaxias en el grupo.

Excluyendo las zonas cercanas a las cuatro galaxias y aplicando el mismo corte en magnitud que en el caso de la muestra de objetos de NGC 6861 (ver Sección 7.1), sólo 36 fuentes puntuales sobreviven en el campo de NGC 6845 (Figura 7.5). Este es un número bajo, y si aceptamos que algunos de los mismos puedan ser CGs del grupo, esto significa que nuestra fotometría de NGC 6861 posee una contaminación menor al 8%.

Para el resto de las galaxias de la muestra (NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546 y NGC 5838), como se mencionó anteriormente, no se pudieron obtener campos de comparación. Es por ello que se decidió adoptar la siguiente metodología para estimar una contaminación en cada una de ellas. Dado que las mismas presentan un mosaico de imágenes conformado por más de un campo (excepto el caso de NGC 2612 que se explicará a continuación), se consideraron como zonas de control aquellas regiones más alejadas de cada una de ellas. Es necesario mencionar que esto constituye una solución de compromiso, ya que es difícil asegurar en la mayoría de los casos que dichas zonas se

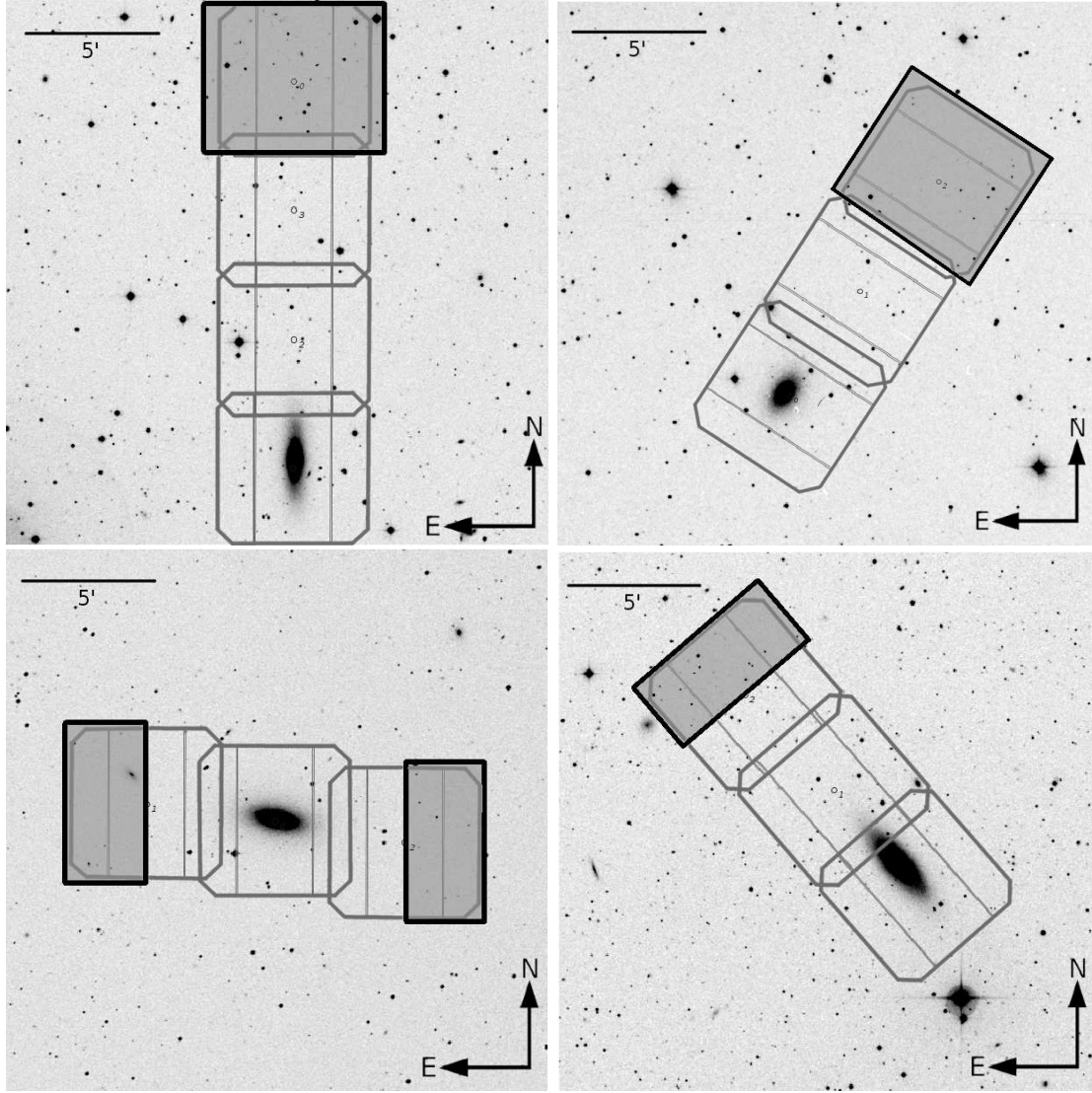


FIGURA 7.6: Regiones utilizadas para estimar la contaminación en las galaxias que no contaban con campo de comparación (regiones sombreadas). De izquierda a derecha y arriba hacia abajo, se muestran las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 4546 y NGC 5838.

encuentren realmente libres de CGs. Tal es así que, adoptando las distancias indicadas en la Tabla 2.1, tendremos que el borde de nuestros mosaicos se encuentra a unos 60 kpc para el caso de NGC 2549, 77 kpc para NGC 2880, 20 kpc para NGC 2612, 30 kpc para NGC 4546, 22 kpc para NGC 3414, 80 kpc para NGC 5838 y 95 kpc para NGC 6861. Considerando entonces que usualmente los sistemas de CGs se extienden entre unos 50 y 100 kpc de radio galactocéntrico, es evidentemente esperable que los CGs se extiendan hasta los bordes de la mayoría de nuestros mosaicos. Sin embargo, también debe considerarse que debido a que los mismos aparecen concentrados hacia cada galaxia, es también esperable que el número de CGs presentes en dichos bordes sea relativamente bajo. Sobre todo, en las galaxias menos masivas de la muestra.

La Figura 7.6 muestra las regiones consideradas para estimar la contaminación en cada

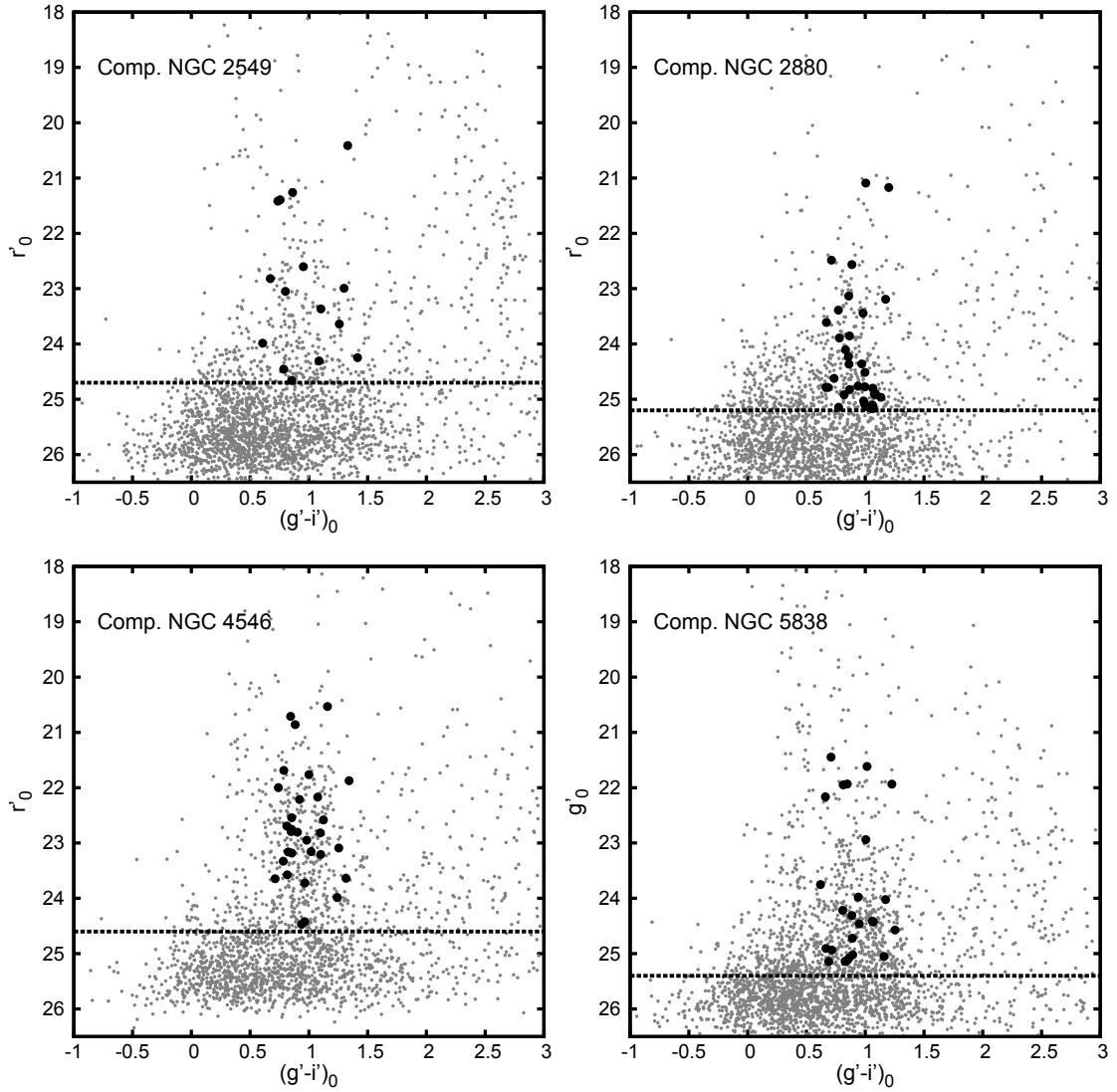


FIGURA 7.7: Diagramas color-magnitud de los objetos puntuales (puntos grises) presentes en los campos de las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 4546 y NGC 5838, respectivamente. Los puntos negros muestran los objetos utilizados como contaminación, de acuerdo con los criterios de corte en color y magnitud empleados para la selección de CGs en las mencionadas galaxias. La línea de trazos horizontal indica el valor de magnitud correspondiente al 80% de completitud.

mosaico. Por su parte, en la Figura 7.7 se presentan los DCM de los objetos puntuales presentes en cada una de esas zonas, además de señalarse los objetos con colores y magnitudes dentro de los rangos esperados para CGs. Los mismos representan para la muestra total de candidatos en NGC 2549, NGC 2880, NGC 4546 y NGC 5838, una contaminación de 20%, 22%, 20% y 25%, respectivamente. Estos valores se obtuvieron teniendo en cuenta la diferencia de área entre la región considerada de contaminación y la correspondiente a su mosaico. Por lo mencionado anteriormente, es necesario remarcar el hecho que estos valores corresponden a cotas superiores en los niveles estimados de contaminación.

Como mencionamos anteriormente, NGC 2612 cuenta con un solo campo de ciencia

observado (Fig. 3.2). Esto, dada la baja masa de la galaxia en cuestión, implica un problema considerable a la hora de intentar determinar cual es el nivel de contaminación de la muestra de candidatos correspondiente. El DCM de dichos candidatos (Fig. 7.3), muestra claramente que constituye un sistema pobre en relación al resto de las galaxias de la muestra. Por otro lado, la latitud galáctica a la que se encuentra NGC 2612 ($b = 15^\circ 41' 37''$) implica que existe un número considerable de estrellas del disco de la Vía Láctea en nuestro catálogo. Todo esto dificulta aún más la tarea de estimar el número de objetos contaminantes para el sistema de CGs de esta galaxia.

En un intento de acotar el efecto de la contaminación, se procedió a emplear dos pasos. El primero, que tiene por objeto estimar la contaminación por estrellas de nuestra galaxia, se basó en obtener un catálogo sintético de las estrellas esperables en la región galáctica de NGC 2612, empleando el código de síntesis de población estelar TRILEGAL (por sus siglas en inglés; Girardi et al. 2005). Dicho código intenta reproducir las propiedades fotométricas de estrellas ubicadas en una dada dirección (l, b) de la galaxia. Se obtuvo entonces un catálogo para una región similar en tamaño al campo de GMOS, a través del sistema fotométrico de SDSS, y de acuerdo a las coordenadas galácticas de NGC 2612. La tabla obtenida contiene 650 fuentes, de las cuales solo 16 objetos poseen rangos similares en color a los candidatos a CGs (panel izquierdo en Fig. 7.8). El segundo paso, tendiente a estimar la contaminación producida por los objetos cosmológicos de fondo (no resueltos), consistió en emplear un campo cercano a las galaxias NGC 7626 y NGC 7619 (programa GN-2008B-Q-14, PI: Favio Faifer). Dicho campo fue observado con el instrumento GMOS-N, en excelentes condiciones y con exposiciones profundas en las tres bandas de interés para esta Tesis. De aquí en adelante, el mismo se nombrará como campo de comparación de NGC 7626. Luego de realizar los mismos cortes en color y magnitud que los aplicados para NGC 2612, resultó que 51 objetos cumplen con los criterios de selección aplicados a la selección de CGs. Estos objetos se muestran en el panel derecho de la Fig. 7.8. Es evidente allí que la mayoría de estos 51 objetos son efectivamente galaxias de fondo no resueltas, y que el número de estrellas presentes en dicho campo es relativamente bajo. Como se verá posteriormente en los Capítulos 8, 9 y 11, se ensayó con ambas estimaciones de contaminación por separado, y con una combinación de ellas.

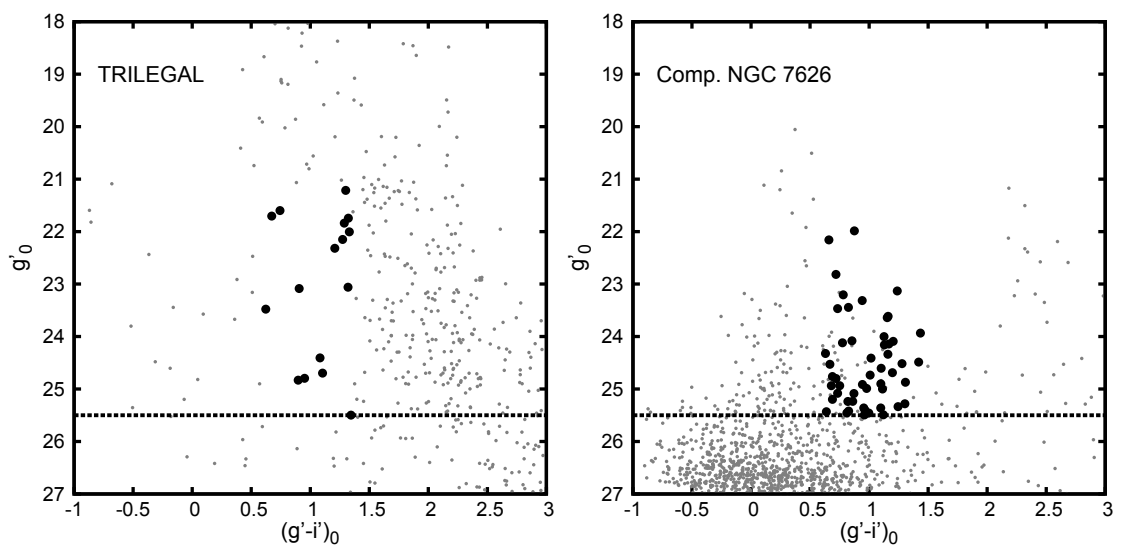


FIGURA 7.8: Panel izquierdo: diagrama color-magnitud obtenido a partir de la simulación TRILEGAL, el cual es utilizado para estimar la contaminación por estrellas de campo en NGC 2612. Panel derecho: diagrama color-magnitud obtenido para el campo de comparación de NGC 7626, utilizado para estimar la contaminación de fondo en el campo de NGC 2612. Los puntos grises y negros representan los objetos que componen los respectivos catálogos y aquellos que cumplen con los mismos cortes en color y magnitud utilizados sobre NGC 2612, respectivamente. La línea de trazos horizontal indica el valor de magnitud correspondiente al 80% de completitud.

Capítulo 8

Distribución de color integrado

8.1 Histogramas de color integrado

Una de las características más significativas y comunes entre los diversos sistemas de CGs, es la presencia de bimodalidad en sus distribuciones de colores integrados (Ostrov et al. 1998; Forbes et al. 1997; Larsen et al. 2001; Peng et al. 2006). Este fenómeno es generalmente interpretado como evidencia de la presencia de al menos dos subpoblaciones de CGs. En principio, dado que los CGs son en su mayoría objetos muy antiguos (con edades mayores a los 10 mil millones de años, Cohen et al. 2003; Dotter et al. 2010) estas subpoblaciones identificadas en base a los colores integrados, implican la existencia de distintas subpoblaciones en metalicidades, y por lo tanto, orígenes distintos para cada subpoblación. Esto es así en nuestra propia galaxia, y también ha sido probado mediante estudios espectroscópicos en otras (Strader et al. 2007; Woodley et al. 2010). Aunque la mayoría de las grandes galaxias con sistemas de CGs bien estudiados revelan clara bimodalidad en sus colores, existen algunas notables excepciones donde o bien la distribución de color se muestra prácticamente unimodal (Faifer et al. 2011; Hargis et al. 2011), o por el contrario, muestran una amplia distribución de colores e indicios de múltiples subestructuras (Blom et al. 2012; Caso et al. 2015). Esto tiene importantes implicancias para los modelos de formación de las galaxias, ya que resulta adecuado suponer que con la formación de cada subpoblación de CGs, también se creó parte de la componente estelar difusa de cada galaxia (Forte et al. 2005, 2007).

Con el objetivo de visualizar y cuantificar las posibles subpoblaciones de CGs presentes en las galaxias estudiadas en esta Tesis, se obtuvieron los histogramas de color $(g' - i')_0$ para cada uno de los sistemas, adicionando al análisis de NGC 4546 la distribución de color $(g' - z')_0$. Los mismos se construyeron mediante el conteo de objetos en intervalos de magnitudes escogidos de acuerdo al número de candidatos en cada galaxia. Así, estos

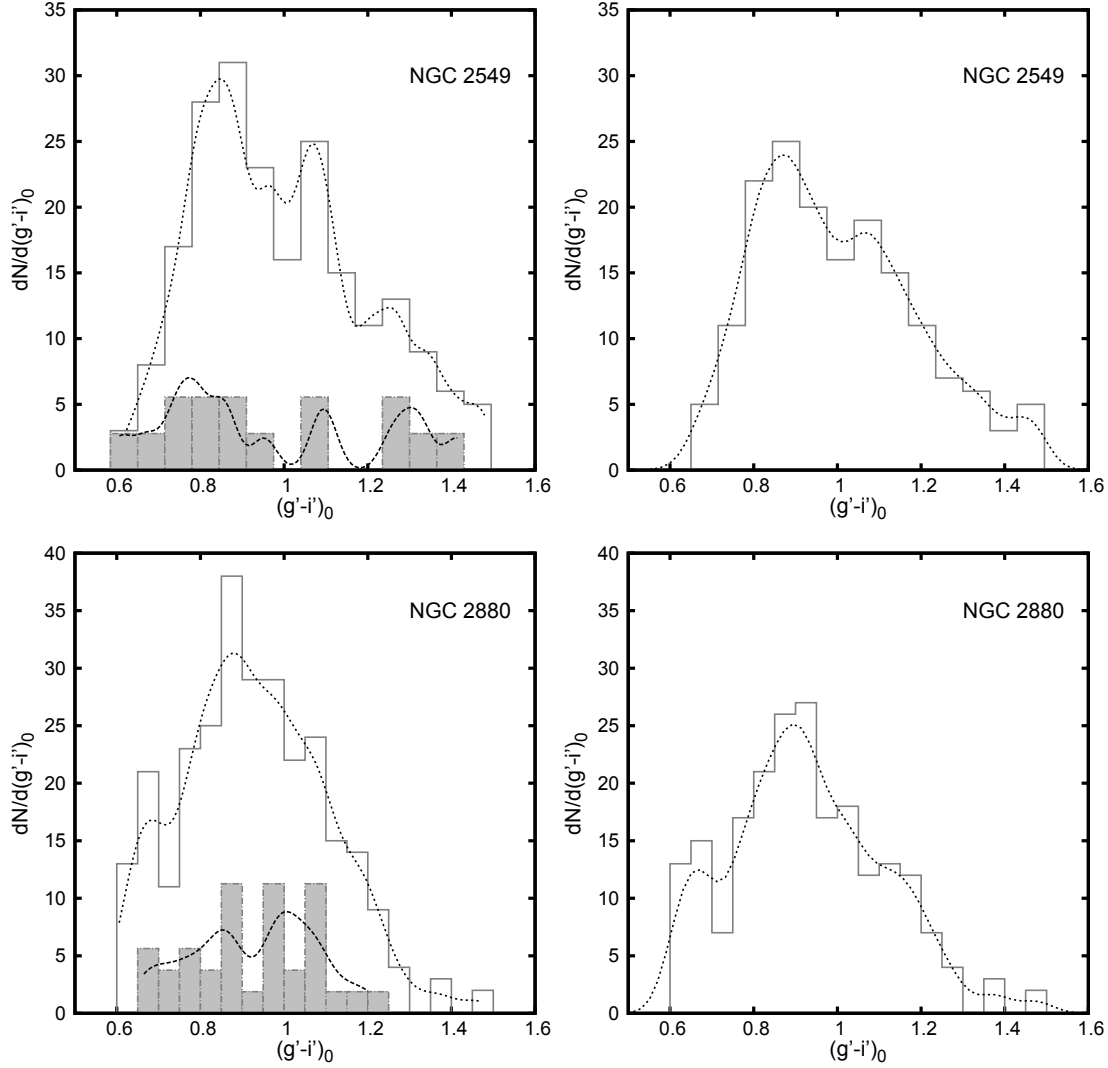


FIGURA 8.1: Paneles izquierdos: histogramas de color $(g' - i')_0$ (y $(g' - z')_0$ en NGC 4546) sin corrección para la muestra de candidatos a CGs en las diferentes galaxias, y aquellos utilizados como contaminación, de acuerdo a lo mencionado en la Sección 7.2. En el caso de NGC 2612, los histogramas gris y gris más oscuro representan la muestra del campo de comparación de NGC 7626 y la muestra de TRILEGAL, respectivamente. Paneles derechos: histogramas corregidos por contaminación. Las líneas punteadas y de trazos sobre los diferentes histogramas representan la distribución de color suavizada utilizando un kernel gaussiano.

intervalos van desde 0.035 mag para los sistemas más ricos, hasta 0.055 mag para los más pobres.

En los paneles izquierdos de la Figura 8.1 se muestran las distribuciones de color crudas de los candidatos a CGs, con la contaminación esperada de acuerdo a lo explicitado en la Sección 7.2. Por su parte, las distribuciones corregidas por dicha contaminación, se muestran en los paneles derechos de la misma figura.

En los casos de NGC 2549, NGC 2880, NGC 4546, NGC 5838 y NGC 6861, el número de objetos contaminantes se multiplicó por un factor que considera las diferencias de áreas

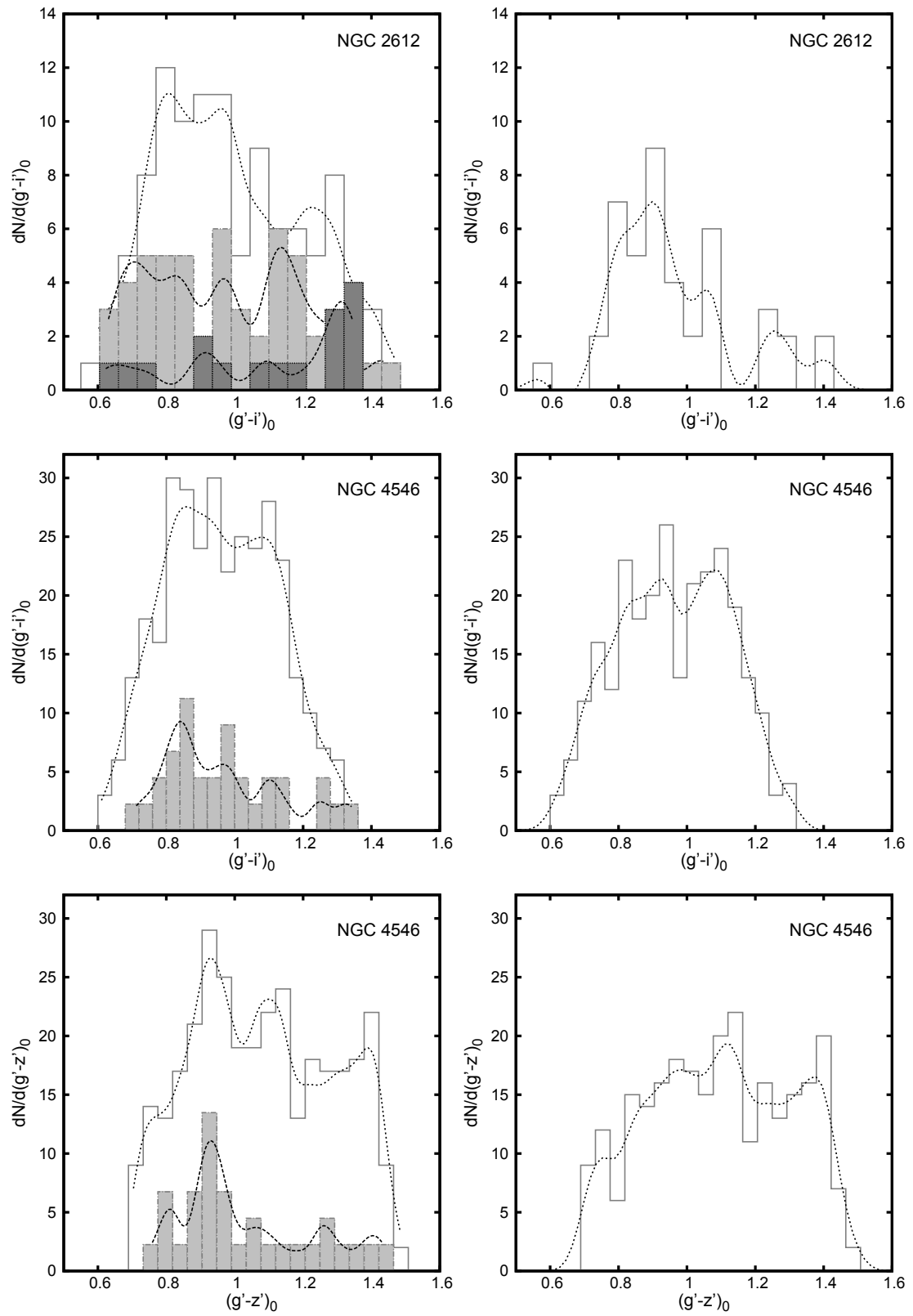


FIGURA 8.1: Continuación

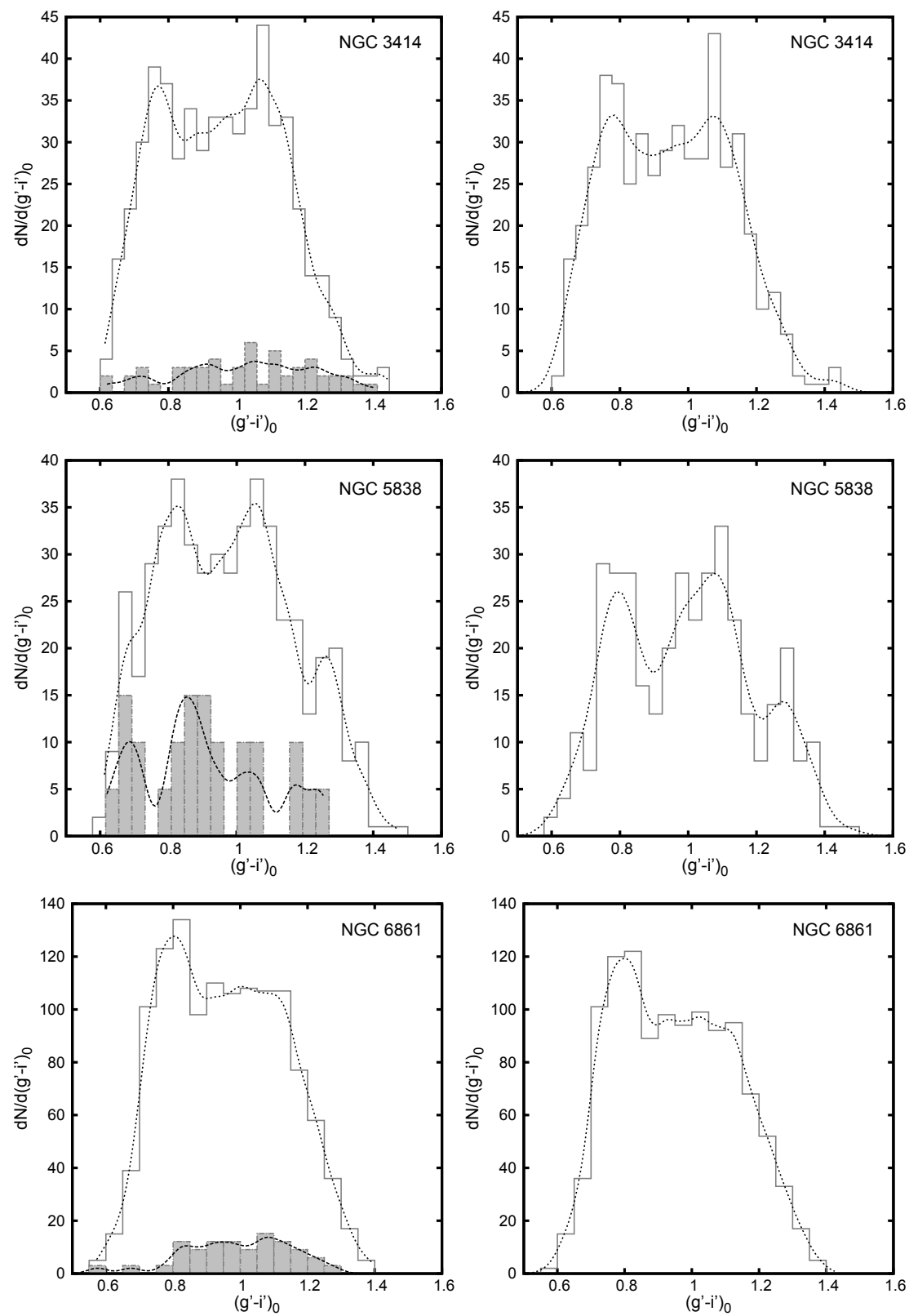


FIGURA 8.1: Continuación.

entre las zonas adoptadas para estimar la contaminación, y aquellas del mosaico de cada galaxia. Sobre los histogramas se representaron las distribuciones de color suavizadas, empleando para ello un kernel gaussiano de $\sigma = 0.03 - 0.04$ mag. Estos valores de σ se consideraron por ser representativos del error medio en los diferentes colores para los candidatos a CGs en cada galaxia.

Las distribuciones de color de los diversos sistemas de CGs aquí estudiados, muestran diferentes subestructuras posiblemente asociadas a distintas subpoblaciones de CGs presentes en ellas. A simple vista, en los casos de NGC 3414, NGC 4546 (color $(g' - i')_0$) y NGC 6861, los histogramas suavizados muestran en principio la presencia de dos grupos dominantes de CGs. Por el contrario, en el resto de las galaxias, sus sistemas de CGs presentan estructuras más complejas.

A modo de comparación, la Figura 8.2 muestra el histograma de color $(g' - i')_0$ correspondiente al sistema de CGs de la galaxia lenticular NGC 3115 (Faifer et al., 2011). El mismo representa un claro ejemplo de bimodalidad presente en dicha galaxia, mostrando las clásicas subpoblaciones azul $((g' - i')_0 \sim 0.76$ mag) y roja $((g' - i')_0 \sim 1.05$ mag), respectivamente. NGC 3115 es la galaxia más masiva de un grupo pequeño, ubicada a una distancia ~ 9.7 Mpc (Cantiello et al., 2015). Dicha galaxia presenta un disco prominente, encontrándose dominada por su bulbo ($B/T \geq 0.9$), ambos rotando en el mismo sentido. Su sistema de CGs se estima en 571 ± 190 CGs, lo que corresponde con una frecuencia específica de $S_N = 2.0 \pm 0.7$ (Faifer et al., 2011). Norris et al. (2006), utilizando espectroscopía de ranura larga y modelos SSP, encuentran que la componente estelar asociada al disco resulta más joven ($\sim 6 \times 10^9$ años y $[\alpha/\text{Fe}] \sim 0.17$) en comparación a la componente esferoidal ($\sim 12 \times 10^9$ años y $[\alpha/\text{Fe}] \sim 0.2 - 0.3$), siendo esta última consistente con la subpoblación de CGs rojos. Por su parte, Arnold et al. (2011) proponen que la formación del bulbo y halo de esta galaxia se originaron en un proceso de dos fases, una fase disipativa violenta en la región central, seguido de un crecimiento prolongado de las zonas más externas a partir de fusiones menores.

Excluyendo NGC 2612 (que presenta un bajo número de candidatos), de la comparación de los histogramas presentados en la Figura 8.1 con el de NGC 3115 resulta evidente que los sistemas de CGs de la muestra de galaxias de esta Tesis no están constituidos únicamente por las dos poblaciones “clásicas” de CGs. A continuación se intentará caracterizar las posibles subestructuras presentes en los histogramas de color. Dado que se han detectado gradientes de color en las distintas subpoblaciones de CGs en diversas galaxias (Forte et al. 2001; Bassino et al. 2006; Harris 2009a,b; Forbes et al. 2011), así como existe la posibilidad de que algunas subpoblaciones se encuentren restringidas a zonas particulares de los sistemas, resulta conveniente separar las muestras de candidatos a CGs en diferentes radios galactocéntricos, obteniendo sus respectivos histogramas de color. Dado el número de candidatos a CGs obtenidos para cada galaxia (ver Tabla 7.1), se dividieron las muestras en dos zonas, una interna y otra externa, incluyendo

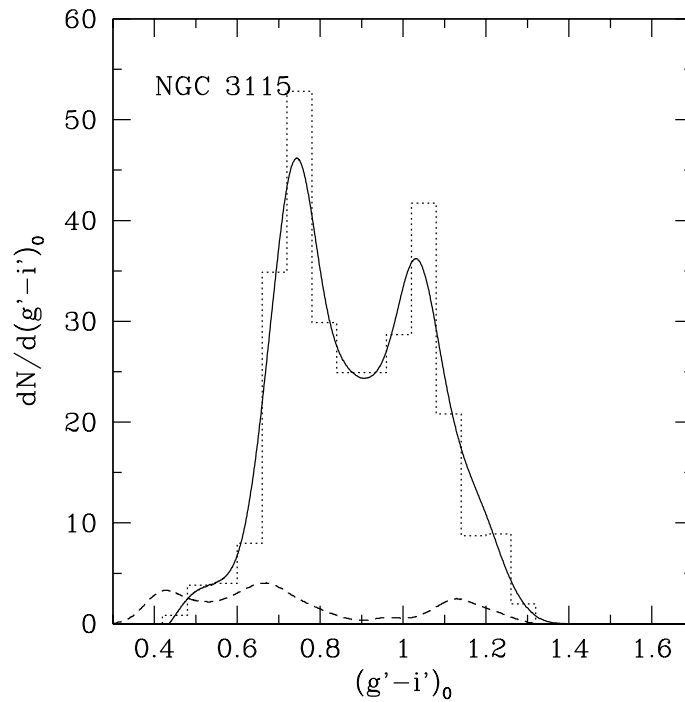


FIGURA 8.2: Histograma de color $(g' - i')_0$ correspondiente al sistema de CGs de la galaxia lenticular NGC 3115 (línea punteada) presentado en Faifer et al. (2011). Las líneas continua y de trazos representan la distribución de color suavizada y la correspondiente al nivel de contaminación estimado en dicho trabajo.

el mismo número de objetos en ambas (misma significancia estadística). En el caso de NGC 3414 y NGC 6861, dado el alto número de candidatos, se consideraron cuatro intervalos radiales diferentes con aproximadamente 137 objetos cada uno para NGC 3414 y 310 objetos cada uno para NGC 6861.

Es usual encontrar en la literatura que el método empleado para identificar y caracterizar las distintas subpoblaciones presentes en los sistemas de CGs, es el de utilizar una descripción en base a funciones gaussianas de cada una de dichas subpoblaciones (Armandroff & Zinn 1988; Geisler et al. 1996; Wehner et al. 2008; Faifer et al. 2011). Es importante destacar que no existe un fundamento físico basado en teorías de formación de los CGs que implique que dichas funciones sean las más adecuadas. Tal es así, que en trabajos como los de Forte et al. (2009, 2012) se han aplicado con éxito procedimientos distintos basados en la descomposición en el espacio de metalicidades y no en el de colores integrados. Si bien un análisis del tipo presentado en dichos trabajos constituye un aspecto interesante, en esta Tesis se ha optado por realizar un primer análisis siguiendo únicamente los métodos más simples utilizados de la literatura.

En tal contexto, y con el objetivo de cuantificar las modas y dispersiones de las diferentes subpoblaciones de candidatos a CGs, utilizamos el algoritmo GMM (*Gaussian mixture model*; Muratov & Gnedin 2010) sobre las distribuciones de color y el algoritmo

RMIX¹ en los respectivos histogramas de color. El primero emplea una función de densidad de probabilidad paramétrica representada como la suma pesada de densidades de componentes gaussianas. GMM cuantifica si una distribución multimodal proporciona un mejor ajuste que una unimodal, utilizando para ello, tres estadísticas. Las mismas son: (1) el método paramétrico bootstrap (p), valores bajos indican una distribución multimodal; (2) la separación entre medias estimadas (D), relativa a las dispersiones de las poblaciones, donde un valor $D > 2$ implica distribución multimodal; y (3) la curtosis (k) de la distribución de entrada, donde un valor $k < 0$ es condición necesario pero no suficiente para bimodalidad. Por su parte, RMIX analiza histogramas como mezclas de distribuciones estadísticas, brindando el mejor ajuste posible. Las ventajas que presentan ambos algoritmos son: la posibilidad de definir valores iniciales para las modas y fijar iguales dispersiones (modo homocedástico) o diferentes dispersiones (modo heterocedástico) de las componentes.

Para cada caso particular se analizaron las distribuciones de color con los ajustes obtenidos por ambos algoritmos, de manera de comprobar una consistencia en los resultados. Sin embargo, algunas de las galaxias mostraron que el ajuste de dos componentes no es suficiente, requiriendo un análisis más detallado.

A continuación, se presenta el análisis realizado para cada galaxia.

NGC 2549: la distribución de color corregida del sistemas de CGs de esta galaxia (Fig. 8.1), no muestra signos de una clara bimodalidad. El histograma de color se encuentra dominado por la presencia de la subpoblación azul de CGs en $(g' - i')_0 \sim 0.84$ mag, y presenta una subpoblación roja en $(g' - i')_0 \sim 1.07$ mag. Estos CGs rojos presentan una “rodilla” que se extiende hacia el extremo rojo. Al visualizar los histogramas para diferentes distancias galactocéntricas (Figura 8.3), se aprecia que los cúmulos azules parecen dominar la región más interna ($R_{\text{gal}} < 88''$) en comparación con la subpoblación roja, con el posible “valle” entre las mismas en $(g' - i')_0 \sim 0.97$ mag. Por otro lado, hacia radios galactocéntricos mayores ($R_{\text{gal}} > 88''$), la presencia de bimodalidad se vuelve menos clara, debido probablemente a la excesiva corrección por contaminación en determinados intervalos de colores. Para cuantificar las posiciones de las subpoblaciones de CGs en NGC 2549, se utilizaron los algoritmos GMM sobre la distribución de color y RMIX sobre el histograma corregido de la muestra completa de candidatos. Los valores resultantes en dichos ajustes son utilizados posteriormente para lograr una separación entre las mismas. Inicialmente, se utilizaron dos distribuciones gaussianas sobre los datos. Sin embargo, aunque el conteo de objetos es bajo, el exceso de candidatos hacia colores más rojos ($(g' - i')_0 > 1.2$ mag) produce que la distribución de color para la subpoblación roja resulte ancha, dificultando el ajuste. Debido a esto se optó por utilizar tres distribuciones gaussianas sobre los datos, utilizando el modo heterocedástico

¹RMIX se encuentra disponible públicamente en <http://www.math.mcmaster.ca/peter/mix/mix.html>

en GMM y el modo homocedástico en RMIX, este último para facilitar la convergencia. La Tabla 8.1 lista los valores obtenidos por los mismos, mientras que el panel inferior de la Fig. 8.3 representa el ajuste obtenido por RMIX sobre el histograma corregido de toda la muestra de candidatos a CGs.

En resumen, el sistema de CGs de NGC 2549 se puede describir como una subpoblación azul dominante, una subpoblación roja clásica, y un grupo de candidatos que se extiende hacia el extremo rojo. Dado que el mosaico incluye la zona central, y que además, los CGs rojos se encuentran usualmente más concentrados que los azules, resulta llamativo que la muestra presentada aquí se encuentre dominada por los CGs azules. Además de ello, debemos mencionar que el pico azul resulta un tanto más rojo de lo esperado.

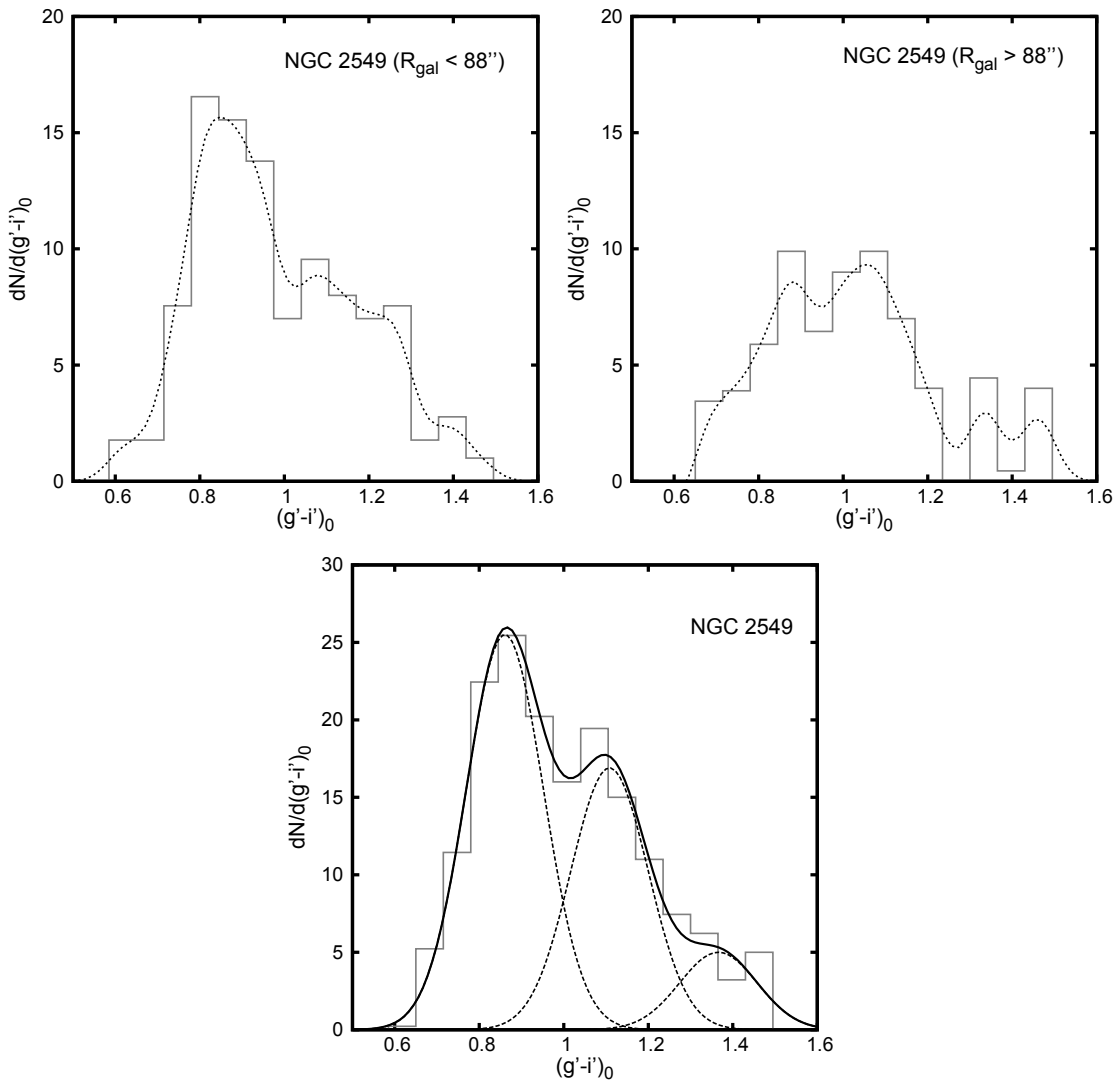


FIGURA 8.3: Histogramas de color corregidos por contaminación para las regiones $R_{\text{gal}} < 88''$ (panel superior izquierdo) y $R_{\text{gal}} > 88''$ (panel superior derecho). En los paneles superiores la línea punteada muestra la distribución de color suavizada mediante un kernel gaussiano. En el panel inferior se observa el ajuste obtenido por RMIX sobre el histograma de color corregido de la muestra completa de candidatos a CGs.

Algoritmo (Valores estad.)		Azul	Subpoblación	
			Roja	+Roja
GMM (trimodal) ($p = 0.001$; $D = 2.82 \pm 0.43$; $k = -0.607$)	μ	0.842 ± 0.024	1.065 ± 0.032	1.293 ± 0.060
	σ	0.094 ± 0.016	0.058 ± 0.032	0.101 ± 0.027
	f	0.860 ± 0.016	1.108 ± 0.028	1.366 ± 0.042
RMIX (trimodal) ($\chi^2 = 2.37$)	μ	0.860 ± 0.016	1.108 ± 0.028	1.366 ± 0.042
	σ	0.091 ± 0.010	0.091 ± 0.010	0.091 ± 0.010
	f	0.535 ± 0.060	0.360 ± 0.054	0.105 ± 0.040

TABLA 8.1: NGC 2549. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color $(g' - i')_0$ correspondiente a la muestra completa de candidatos a CGs. Se listan los valores estadísticos (p , D , k , χ^2) junto con el color medio μ , la dispersión σ y la fracción de objetos (f) asignados por RMIX a cada subpoblación de CGs.

NGC 2880: al observar el histograma de color suavizado (Fig. 8.1), se aprecia una distribución casi unimodal, presentado un claro pico en el valor modal $(g' - i')_0 \sim 0.90$ mag. Esta ausencia clara de bimodalidad aún persiste cuando se observan los histogramas a diferentes radios galactocéntricos (paneles superiores en Figura 8.4). Al igual que en el caso de NGC 2549, el histograma de la región más externa presenta diferentes subestructuras. Sin embargo, tal resultado debe tomarse con cautela debido a que el mencionado histograma presenta conteos bajos. Recordemos, en tal contexto, que el nivel de contaminación aplicado corresponde a la zona externa del sistema, por lo que es muy posible que se hayan restado objetos excesivamente. La apariencia mostrada por la distribución de color del sistema de CGs de NGC 2880, se asemeja al caso de la galaxia lenticular NGC 524 estudiada en Faifer et al. (2011).

Con el objetivo de estimar la ubicación en color de las posibles subpoblaciones de CGs en esta galaxia, se consideraron aquellos candidatos en el rango en brillos $22.8 < r'_0 < 25$ mag, es decir descartando los objetos más débiles y los más brillantes, estos últimos con el fin de evitar la distribución unimodal habitual de los objetos masivos. Luego, se utilizaron los algoritmos GMM sobre la distribución de color y RMIX sobre el histograma. En ambos casos se utilizaron tres distribuciones gaussianas, en modo heterocedástico, debido a las asimetrías observadas alrededor de $(g' - i')_0 \sim 0.90$ mag. La Tabla 8.2 lista los valores obtenidos de dichos ajustes. En el panel inferior de la Fig. 8.4 se visualizan las distintas componentes gaussianas ajustadas por RMIX sobre la muestra de candidatos en el rango de magnitudes anteriormente mencionado. El grupo de candidatos a CGs en $(g' - i')_0 \sim 0.66$ mag, parece evidenciar la presencia de CGs más azules que la típica subpoblación azul.

En resumen, la distribución de color del sistema de CGs de esta galaxia se puede describir como bimodal, con una subpoblación azul dominante en $(g' - i')_0 \sim 0.85$ mag (muy parecida a NGC 2549), y una subpoblación roja menos conspicua. Adicionalmente, parece existir un grupo de CGs más azules.

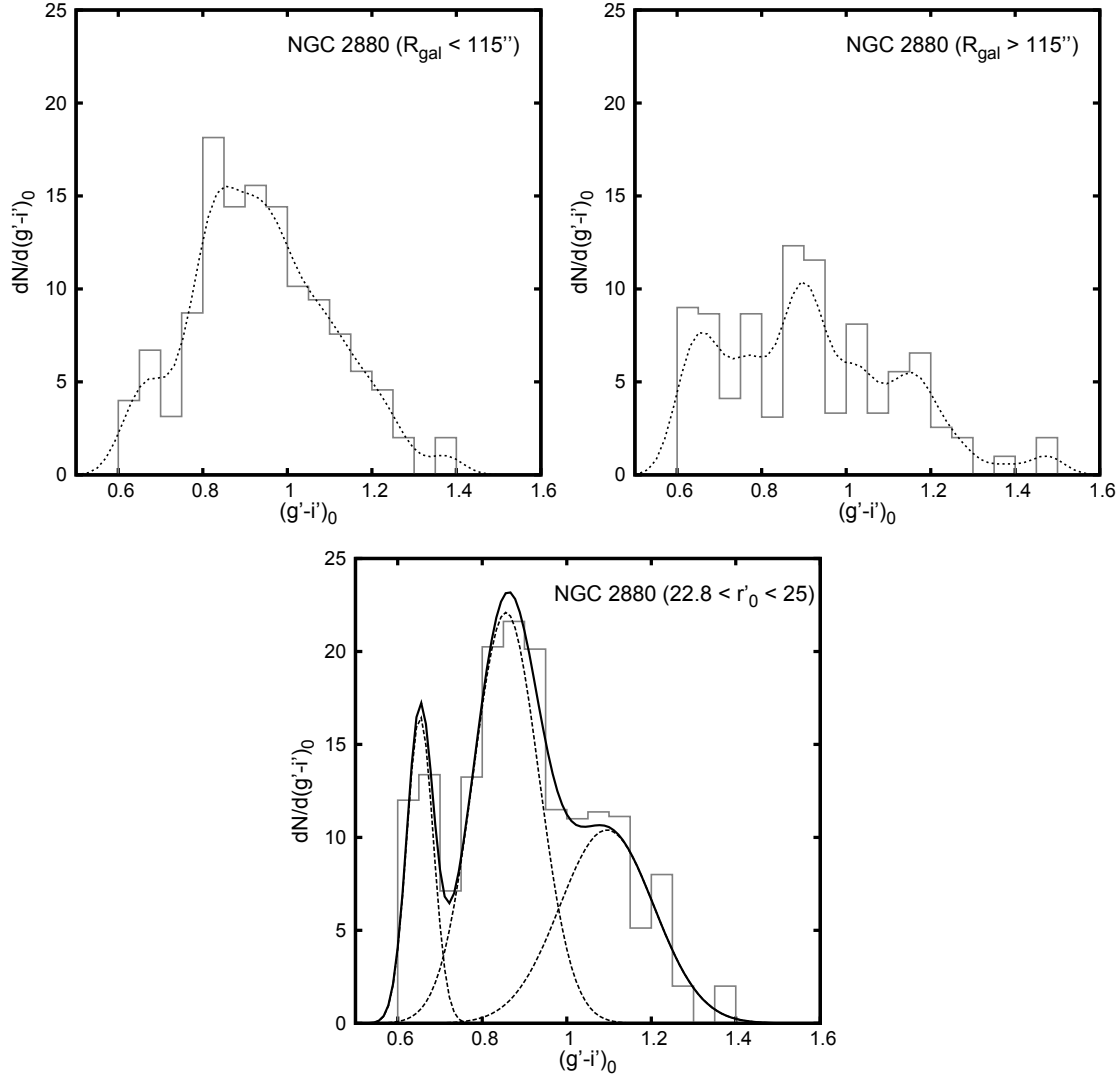


FIGURA 8.4: Histogramas de color corregidos por contaminación para las regiones $R_{\text{gal}} < 115''$ y $R_{\text{gal}} > 115''$ (paneles superiores) de NGC 2880. En los mismos la línea punteada muestra la distribución de color suavizada mediante un kernel gaussiano. En el panel inferior se muestra el ajuste obtenido por RMIX sobre la muestra de candidatos a CGs en el rango $22.8 < r'_0 < 25$ mag.

Algoritmo (Valores estad.)		+Azul	Subpoblación Azul	Roja
GMM				
3 gaussianas	μ	0.663 ± 0.009	0.848 ± 0.020	1.063 ± 0.042
$(p = 0.001; D = 3.57 \pm 0.44; k = -0.533)$	σ	0.033 ± 0.005	0.066 ± 0.016	0.118 ± 0.020
RMIX				
3 gaussianas	μ	0.652 ± 0.013	0.856 ± 0.020	1.094 ± 0.057
$(\chi^2 = 3.27)$	σ	0.031 ± 0.023	0.077 ± 0.024	0.111 ± 0.031
	f	0.148 ± 0.053	0.504 ± 0.162	0.348 ± 0.134

TABLA 8.2: NGC 2880. Valores obtenidos por GMM y RMIX para la distribución de color $(g' - i')_0$ de los candidatos a CGs en el rango $22.8 < r'_0 < 25$ mag. Se listan los valores estadísticos (p, D, k, χ^2) junto con el color medio μ , la dispersión σ y la fracción de objetos (f) asignados por RMIX a cada subpoblación de CGs.

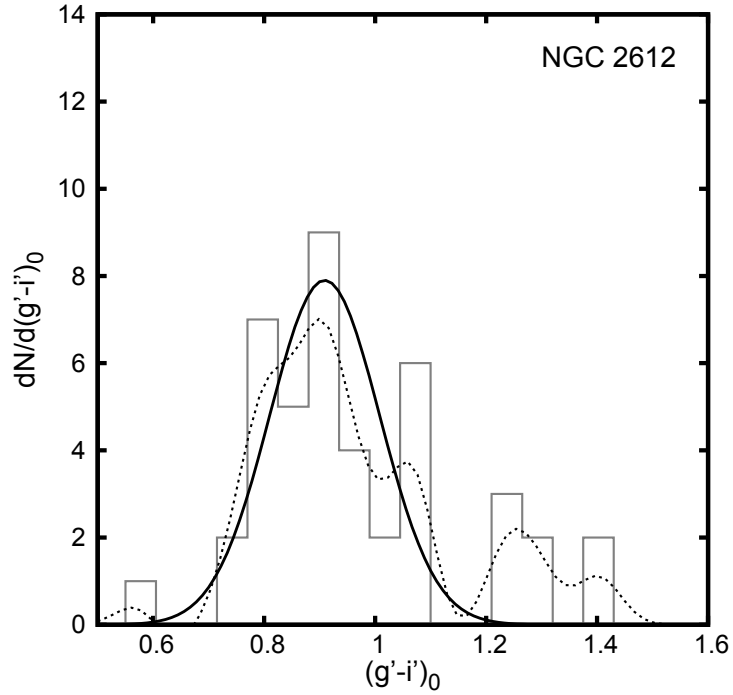


FIGURA 8.5: Histograma de color de NGC 2612 corregido a partir del campo de comparación de NGC 7626 y el modelo TRILEGAL. La línea continua y la línea punteada negra muestran el ajuste gaussiano obtenido por RMIX y la distribución de color suavizada mediante un kernel gaussiano, respectivamente.

NGC 2612: el sistemas de CGs de esta galaxia es el más pobre de la muestra. Su distribución de color (Fig. 8.1) presenta diferentes subestructuras, con picos en los valores modales $(g'-i')_0 \sim 0.79$, $(g'-i')_0 \sim 0.95$ y $(g'-i')_0 \sim 1.2$ mag. Luego de realizar las correcciones por contaminación utilizando el campo de comparación asociado a la galaxia NGC 7626 y el modelo TRILEGAL (Figura 8.5), se observa que sobrevive un grupo de objetos en $(g'-i')_0 \sim 0.9$ mag. El bajo conteo en el histograma de color, no permite caracterizar las posibles subpoblaciones que presentaría esta galaxia. Por ello, se utilizó RMIX ajustando una distribución gaussiana a la distribución de color corregida, para estimar el color medio de la población de CGs. Los valores obtenidos en dicho ajuste resultaron en $\mu = 0.909 \pm 0.017$; $\sigma = 0.099 \pm 0.012$ mag. De acuerdo a lo visto en la Sección 6.2 sobre las características que presenta NGC 2612 en su análisis isofotal y el mapa de color, el valor medio en el color puede estar asociado a una subpoblación intermedia en el sistema de CGs de esta galaxia.

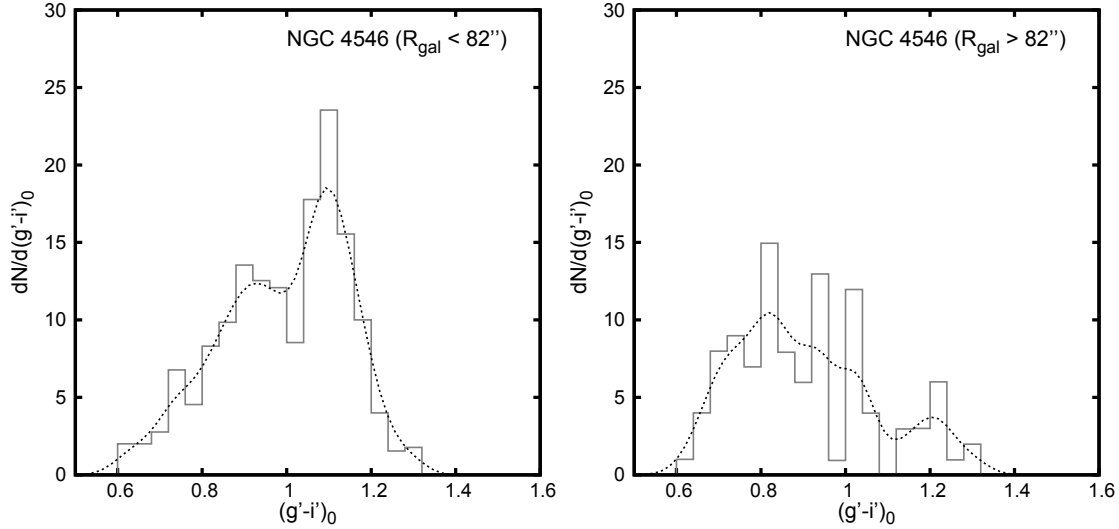


FIGURA 8.6: Histogramas de color $(g' - i')_0$ corregidos por contaminación para las regiones $R_{\text{gal}} < 82''$ y $R_{\text{gal}} > 82''$ de NGC 4546. En los mismos la línea punteada muestra la distribución de color suavizada mediante un kernel gaussiano.

NGC 4546: la distribución de color $(g' - i')_0$ de esta galaxia, muestra una apariencia ancha (Fig. 8.1), con un claro pico en el valor modal $(g' - i')_0 \sim 1.09$ mag (típico para CGs rojos) y un pico menos definido en $(g' - i')_0 \sim 0.9$ mag con subestructuras a su alrededor. Al observar los histogramas $(g' - i')_0$ a diferentes radios galactocéntricos (Figura 8.6), se observa en la parte interna el dominio de los CGs rojos, sin embargo un segundo pico se vuelve visible en $(g' - i')_0 \sim 0.93$ mag. El mismo, posiblemente se asocie a la presencia de una subpoblación de CGs con metalicidad y/o edades diferentes de las típicas azul y roja (ver Capítulo 14). Hacia R_{gal} mayores, el histograma correspondiente muestra la presencia de los CGs azules alrededor de $(g' - i')_0 \sim 0.8$ mag. Es importante remarcar el hecho de que las regiones consideradas para evaluar la contaminación (ver Sección 7.2), posiblemente contengan un número detectable de CGs azules. Esto se observa en el histograma correspondiente a la contaminación (Fig. 8.1), el cual posee un claro pico alrededor de $(g' - i')_0 \sim 0.83$ mag. La resta de estos objetos puede entonces estar produciendo un déficit de la subpoblación azul en el histograma corregido.

Por otra parte, al observar la distribución cruda de color $(g' - z')_0$ (Fig. 8.1), la bimodalidad no resulta del todo clara, presentando más bien dos picos modales en $(g' - z')_0 \sim 1.1$ y en $(g' - z')_0 \sim 1.38$ mag, mientras que hacia colores más azules ($(g' - z')_0 < 1.01$) la distribución se muestra como una “rodilla” con diferentes subestructuras. En este caso, es claro nuevamente que se han descartado un número considerable de CGs azules al realizar la resta por contaminación. Los histogramas a diferentes radios galactocéntricos para $(g' - z')_0$ (Figura 8.7) muestran un comportamiento similar al compararlos con los respectivos $(g' - i')_0$. Sin embargo, en este caso la presencia de un pico intermedio resulta más clara.

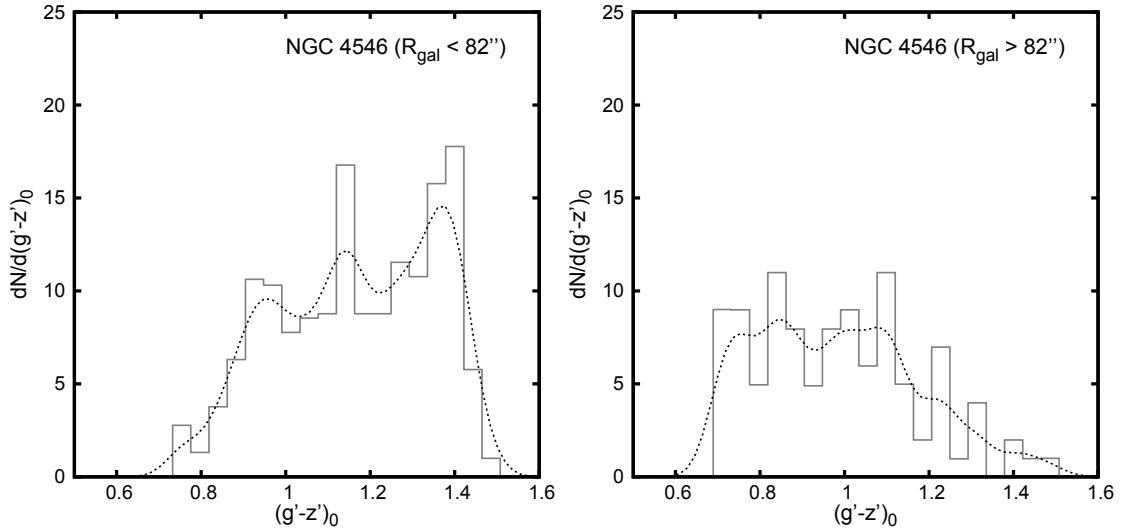


FIGURA 8.7: Histogramas de color $(g' - z')_0$ corregidos por contaminación para las regiones $R_{\text{gal}} < 82''$ y $R_{\text{gal}} > 82''$ de NGC 4546. En los mismos la línea punteada muestra la distribución de color suavizada mediante un kernel gaussiano.

Para cuantificar la presencia de tres subpoblaciones en el sistema de CGs de NGC 4546, se utilizó GMM sobre las distribuciones de color $((g' - i')_0$ y $(g' - z')_0$ y RMIX sobre los histogramas corregidos de la muestra completa de candidatos (Figura 8.8). En ambos casos se ajustaron una distribución bimodal y trimodal (Tabla 8.3). Los valores de χ^2 obtenidos por RMIX indican que este último caso produce un mejor ajuste con respecto a un distribución bimodal. Para facilitar la convergencia en el ajuste realizado por RMIX sobre el color $(g' - z')_0$, se consideró el modo homocedástico.

En resumen, el histograma de colores de NGC 4546 resulta trimodal, con una subpoblación azul “clásica”, una subpoblación roja “clásica” y una subpoblación con colores intermedios. Estas dos últimas dominan la muestra considerada aquí.

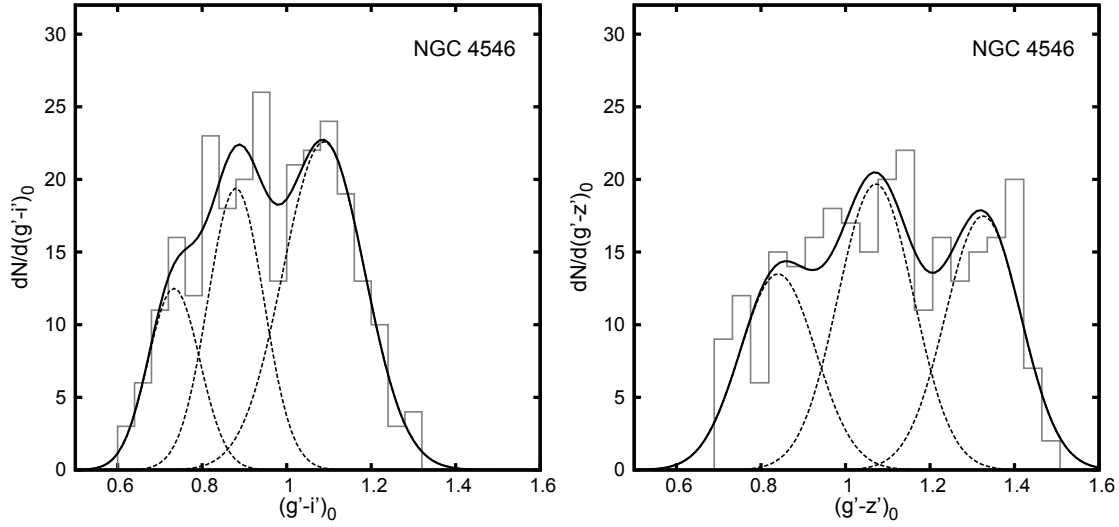


FIGURA 8.8: Histogramas de color $(g' - i')_0$ (panel izquierdo) y $(g' - z')_0$ (panel derecho) corregidos por contaminación en NGC 4546. Las líneas de trazos representan el ajuste de las diferentes distribuciones gaussianas obtenidas por RMIX.

Algoritmo (Valores estad.)		Azul	Subpoblación Intermedia	Roja
GMM				
BIMODAL $(g' - i')_0$ ($p = 0.001$; $D = 2.47 \pm 0.23$; $k = -0.779$)	μ	0.835 ± 0.025	—	1.085 ± 0.029
	σ	0.095 ± 0.010	—	0.108 ± 0.014
TRIMODAL $(g' - i')_0$ ($p = 0.003$; $D = 2.57 \pm 0.23$; $k = -0.779$)	μ	0.751 ± 0.063	0.912 ± 0.085	1.109 ± 0.074
	σ	0.059 ± 0.024	0.061 ± 0.024	0.098 ± 0.029
BIMODAL $(g' - z')_0$ ($p = 0.001$; $D = 2.98 \pm 0.21$; $k = -1.076$)	μ	0.993 ± 0.037	—	1.348 ± 0.043
	σ	0.152 ± 0.020	—	0.066 ± 0.024
TRIMODAL $(g' - z')_0$ ($p = 0.001$; $D = 2.54 \pm 0.28$; $k = -1.076$)	μ	0.883 ± 0.054	1.141 ± 0.062	1.374 ± 0.028
	σ	0.095 ± 0.024	0.102 ± 0.033	0.050 ± 0.016
RMIX				
BIMODAL $(g' - i')_0$ ($\chi^2 = 10.2$)	μ	0.834 ± 0.035	—	1.090 ± 0.033
	σ	0.104 ± 0.018	—	0.097 ± 0.018
	f	0.508 ± 0.132	—	0.492 ± 0.132
TRIMODAL $(g' - i')_0$ ($\chi^2 = 7.93$)	μ	0.733 ± 0.103	0.879 ± 0.067	1.087 ± 0.026
	σ	0.061 ± 0.044	0.066 ± 0.048	0.096 ± 0.015
	f	0.180 ± 0.287	0.305 ± 0.333	0.515 ± 0.098
BIMODAL $(g' - z')_0$ ($\chi^2 = 27.89$)	μ	0.926 ± 0.018	—	1.255 ± 0.018
	σ	0.131 ± 0.008	—	0.131 ± 0.008
	f	0.488 ± 0.051	—	0.512 ± 0.051
TRIMODAL $(g' - z')_0$ ($\chi^2 = 18.1$)	μ	0.840 ± 0.019	1.071 ± 0.021	1.325 ± 0.014
	σ	0.089 ± 0.007	0.089 ± 0.007	0.089 ± 0.007
	f	0.271 ± 0.047	0.389 ± 0.045	0.339 ± 0.040

TABLA 8.3: NGC 4546. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color $(g' - i')_0$ y $(g' - z')_0$. Se listan los valores estadísticos (p , D , k , χ^2) junto con el color medio μ , la dispersión σ y la fracción de objetos (f) asignados por RMIX a cada subpoblación para el caso bimodal y trimodal.

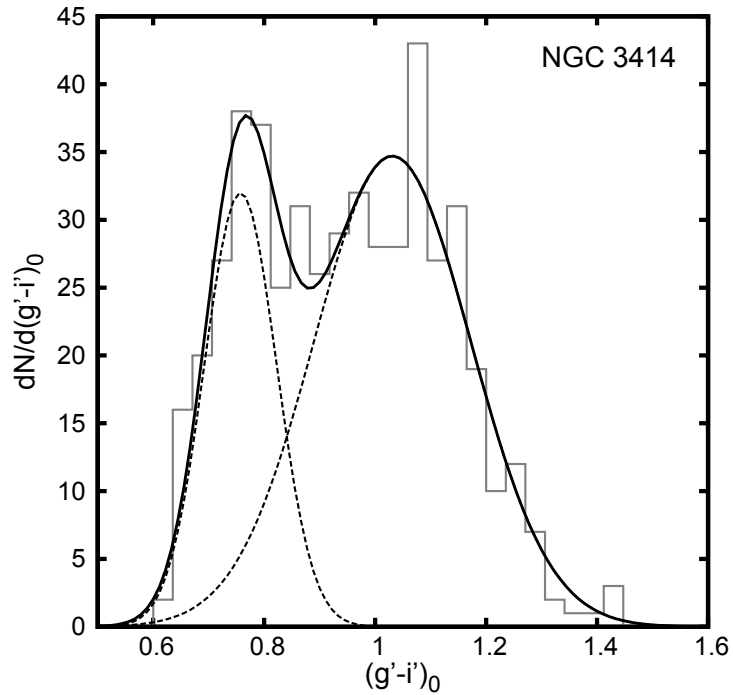


FIGURA 8.9: Histograma de color corregido para NGC 3414. Las líneas de trazos representan el ajuste de dos distribuciones gaussianas obtenido por RMIX.

NGC 3414: el sistema de CGs de esta galaxia muestra en principio, dos grupos dominantes de CGs (Fig. 8.1), con dos picos claros en los valores modales $(g' - i')_0 \sim 0.78$ y $(g' - i')_0 \sim 1.09$ mag, los cuales corresponderían a las típicas subpoblaciones de CGs azul y roja, respectivamente. Al ajustar una distribución bimodal mediante el algoritmo GMM se obtienen los valores $\mu_a = 0.755 \pm 0.014$ mag ($\sigma_a = 0.066 \pm 0.008$) y $\mu_r = 1.038 \pm 0.017$ mag ($\sigma_r = 0.142 \pm 0.009$), mientras que con RMIX $\mu_a = 0.757 \pm 0.011$ mag ($\sigma_a = 0.064 \pm 0.008$) y $\mu_r = 1.031 \pm 0.017$ mag ($\sigma_r = 0.141 \pm 0.010$). Al observar el ajuste realizado por RMIX sobre el histograma (Figura 8.9) se observa, en particular, que la subpoblación roja presenta una distribución de color ensanchada. Blom et al. (2012) encontraron similares características en la galaxia elíptica masiva NGC 4365, donde se propone la existencia de una tercera subpoblación de CGs con colores intermedios. Para explorar si la misma situación ocurre en NGC 3414, se dividió la muestra de candidatos en cuatro intervalos radiales con el mismo número de objetos ($R_{\text{gal}} < 43$, $43-64$, $64-100$ y > 100 segundos de arco). Los histogramas de color corregidos por contaminación se muestran en la Figura 8.10.

En la región más interna se aprecian al menos tres picos, los cuales se encuentran en los valores modales $(g' - i')_0 \sim 0.75$, $(g' - i')_0 \sim 0.96$ y $(g' - i')_0 \sim 1.09$ mag, además un posible grupo de CGs significativamente mas rojos en $(g' - i')_0 \sim 1.24$ mag. El primer y tercer pico se corresponden con los valores típicos para los ya mencionados CGs azules y rojos, mientras que el pico intermedio y el más rojo podrían asociarse a diferentes subpoblaciones presentes en esta galaxia. Hacia radios galactocéntricos

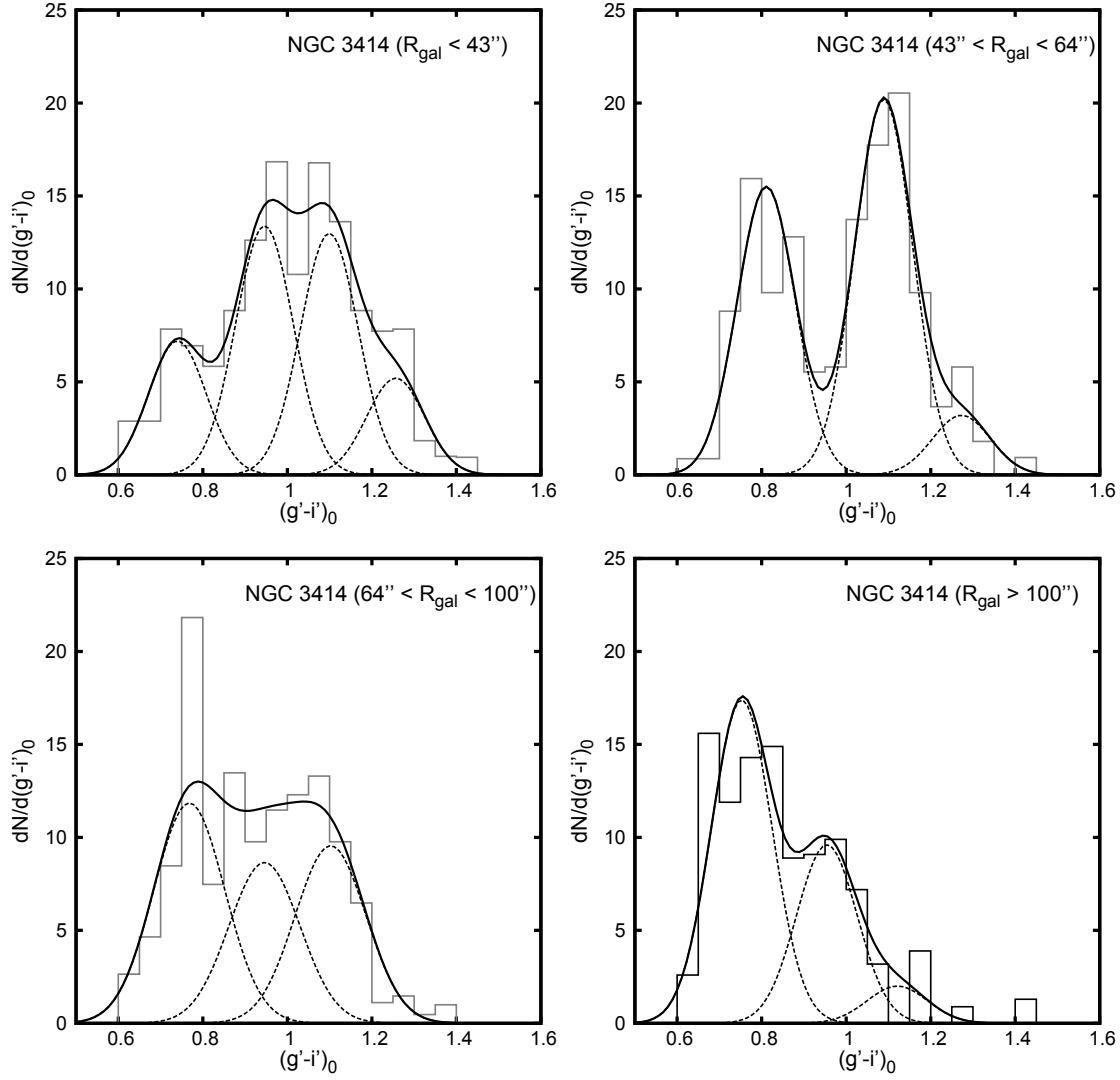


FIGURA 8.10: Histogramas de color corregidos por contaminación para las regiones $R_{\text{gal}} < 43''$, $43'' < R_{\text{gal}} < 64''$, $64'' < R_{\text{gal}} < 100''$ y $R_{\text{gal}} > 100''$ de NGC 3414. En los mismos las líneas de trazos muestran el ajuste de las diferentes distribuciones gaussianas obtenidas por RMIX.

mayores, la subpoblación azul comienza a dominar (tal cual ocurre en otras galaxias), a diferencia de los candidatos rojos que usualmente muestran una mayor concentración hacia el centro de la galaxia. Sin embargo, el pico intermedio parece persistir, aunque en menor medida, en los diferentes histogramas de color.

Con el objetivo de cuantificar las posibles subpoblaciones de CGs presentes en NGC 3414, se aplicó el algoritmo RMIX a las cuatro distribuciones de color antes mencionadas. Los valores obtenidos en los diferentes ajustes se listan en la Tabla 8.4. El ajuste realizado por RMIX sobre los histogramas de color correspondientes a las dos regiones más internas, se realizó considerando el modo homocedástico (iguales dispersiones) para una mejor convergencia del algoritmo.

Dado que NGC 3414 presenta una estructura compleja en la región central (ver Sección 6.2), principalmente por la presencia de polvo, resultará interesante analizar la distribución espacial de las diferentes subpoblaciones de CGs, para ver si alguna de ellas presenta alguna vinculación con dichas estructuras.

Algoritmo RMIX		Azul	Subpoblación Intermedia	Roja	+Roja
$(R_{\text{gal}} < 43'')$ ($\chi^2 = 4.97$)	μ	0.739 ± 0.021	0.945 ± 0.027	1.099 ± 0.032	1.256 ± 0.030
	σ	0.068 ± 0.013	0.068 ± 0.013	0.068 ± 0.013	0.068 ± 0.013
	f	0.180 ± 0.042	0.337 ± 0.081	0.334 ± 0.078	0.147 ± 0.062
$(43'' < R_{\text{gal}} < 64'')$ ($\chi^2 = 10.2$)	μ	0.810 ± 0.010	–	1.089 ± 0.012	1.272 ± 0.034
	σ	0.068 ± 0.006	–	0.068 ± 0.006	0.068 ± 0.006
	f	0.402 ± 0.044	–	0.518 ± 0.052	0.079 ± 0.036
$(64'' < R_{\text{gal}} < 100'')$ ($\chi^2 = 15.7$)	μ	0.768 ± 0.025	0.946 ± 0.024	1.102 ± 0.024	–
	σ	0.084 ± 0.011	0.084 ± 0.011	0.084 ± 0.011	–
	f	0.397 ± 0.057	0.282 ± 0.095	0.321 ± 0.074	–
$(R_{\text{gal}} > 100'')$ ($\chi^2 = 7.45$)	μ	0.752 ± 0.014	0.954 ± 0.034	1.121 ± 0.056	–
	σ	0.071 ± 0.009	0.071 ± 0.009	0.071 ± 0.009	–
	f	0.594 ± 0.077	0.330 ± 0.069	0.075 ± 0.061	–

TABLA 8.4: NGC 3414. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color $(g' - i')_0$. Se listan los valores estadísticos (p , D , k , χ^2) junto con el color medio μ , la dispersión σ y la fracción de objetos (f) asignados por RMIX a cada subpoblación de CGs.

NGC 5838: el sistema de CGs de esta galaxia presenta una clara distribución trimodal de color integrado (Fig. 8.1), con picos en los valores modales $(g' - i')_0 \sim 0.79$, $(g' - i')_0 \sim 1.06$ y $(g' - i')_0 \sim 1.28$ mag. Los dos primeros se encuentran en buen acuerdo con colores típicos para las subpoblaciones de CGs azul y roja, observándose un claro “valle” entre ambas subpoblaciones en $(g' - i')_0 \sim 0.90$ mag. Por su parte, el pico más rojo, si bien puede estar asociado a una subpoblación de CGs diferente, es necesario analizar su distribución espacial para ver si los mismos presentan alguna concentración hacia la galaxia. La Figura 8.11 muestra la distribución de color a diferentes radios galactocéntricos. Allí, se observa que el histograma correspondiente a $R_{\text{gal}} > 92$ segundos de arco todavía muestra la presencia, aunque con mayor ruido, de los tres picos antes mencionados.

Para cuantificar la presencia de estas tres posibles subpoblaciones se aplicaron nuevamente los algoritmos GMM a la distribución de color y RMIX a los histogramas corregidos, ambos en modo heterocedástico (Tabla 8.5). La Fig. 8.11 muestra el ajuste obtenido por RMIX sobre el histograma corregido. La distribución de color, suavizada a diferentes radios galactocéntricos para la subpoblación azul, muestra una leve diferencia entre sus valores modales. Este posible gradiente en el color (y por lo tanto en metalicidad) también se correspondería al observado por Peletier & Balcells (1997), utilizando una combinación de datos ópticos e infrarrojo cercano. Los valores obtenidos por GMM y RMIX para el pico azul “interno” resultaron $\mu_a = 0.830 \pm 0.017$ mag y $\mu_a = 0.829 \pm 0.016$ mag, respectivamente, mientras que para el pico azul “externo”,

$\mu_a = 0.722 \pm 0.038$ mag y $\mu_a = 0.744 \pm 0.009$ mag. Luego, la diferencia obtenida en la ubicación del pico azul es de $\Delta(g' - i')_0 \sim 0.1$ mag.

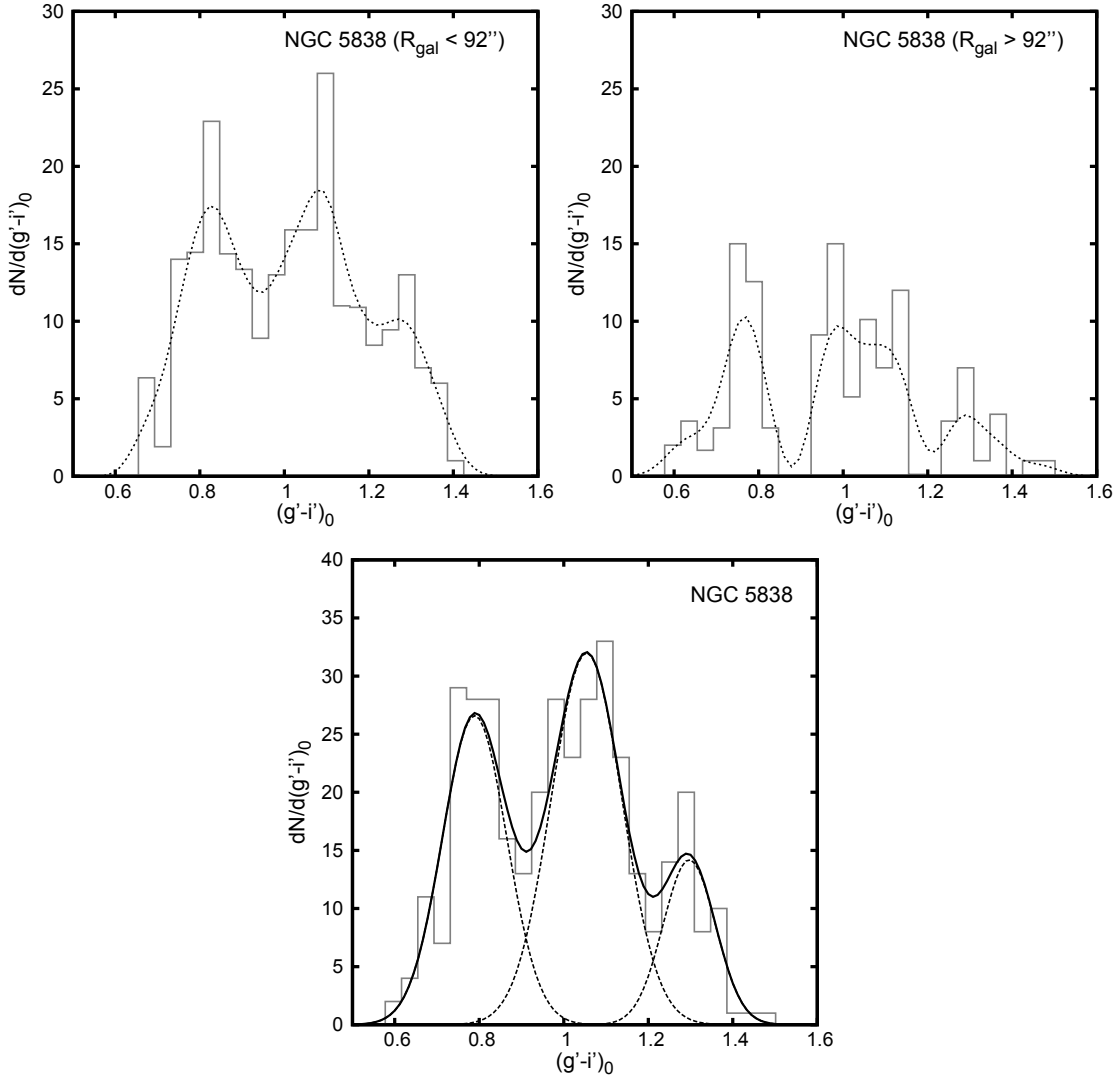


FIGURA 8.11: Histogramas de color corregidos por contaminación para las regiones $R_{\text{gal}} < 92''$ y $R_{\text{gal}} > 92''$ (paneles superiores) de NGC 5838. En los mismos la línea punteada muestra la distribución de color suavizada mediante un kernel gaussiano. El panel inferior muestra el ajuste de las diferentes gaussianas (líneas de trazos) obtenidas por RMIX para la muestra total de candidatos a CGs.

Algoritmo (Valores estad.)		Subpoblación		
		Azul	Roja	+Roja
GMM				
$(p = 0.001; D = 2.76 \pm 0.30; k = -0.831)$	Trimodal	μ	0.783 ± 0.030	1.040 ± 0.033
		σ	0.085 ± 0.013	0.098 ± 0.027
				0.066 ± 0.018
RMIX				
$(\chi^2 = 23.69)$	Trimodal	μ	0.789 ± 0.012	1.054 ± 0.010
		σ	0.076 ± 0.008	0.084 ± 0.012
		f	0.364 ± 0.040	0.476 ± 0.051
				0.158 ± 0.028

TABLA 8.5: NGC 5838. Valores obtenidos con GMM y RMIX sobre la distribución de color $(g' - i')_0$. Se listan los valores estadísticos (p, D, k, χ^2) junto con el color medio μ , la dispersión σ y la fracción de objetos (f) asignados por RMIX a cada subpoblación.

NGC 6861: la distribución de color de los CGs de la galaxia muestra en principio una apariencia bimodal con un claro pico en el valor modal $(g' - i')_0 \sim 0.8$ mag y una distribución ancha centrada en $(g' - i')_0 \sim 1.02$ mag. La ubicación de estos picos se encuentra en buen acuerdo con los obtenidos en otras galaxias (Faifer et al., 2011). Es de destacar que la galaxia S0 NGC 3115, presentada anteriormente como un ejemplo claro de bimodalidad, muestra aproximadamente la misma luminosidad que NGC 6861, pero obteniéndose de esta última una población de CGs mucho mayor y una bimodalidad no tan clara.

En particular, como se mencionó anteriormente, la subpoblación roja presenta una distribución de color ensanchada y plana, similar al caso de NGC 3414. Con el fin de estudiar si ocurre la misma situación en NGC 6861, se dividió la muestra de candidatos a CGs en cuatro intervalos radiales con aproximadamente 310 objetos en cada uno de ellos ($R_{\text{gal}} \leq 46$, $46 - 93$, $93 - 160$ y > 160 segundos de arco). Las distribuciones de color corregidas por contaminación de campo se muestran en la Figura 8.12. Un kernel gaussiano fue utilizado para suavizar las distribuciones.

Se aprecia en la región más interna la subpoblación azul con un valor modal $(g' - i')_0 \sim 0.85$ mag, y un marcado pico rojo claramente visible en el color modal $(g' - i')_0 \sim 1.10$ mag. Hacia R_{gal} mayores, como es esperable, los CGs azules comienzan a dominar. Sin embargo, los candidatos a CGs rojos se vuelven más heterogéneos y al menos otros dos posibles picos parecen aparecer. Uno de ellos en $(g' - i')_0 \sim 0.94$ y el otro alrededor de $(g' - i')_0 \sim 1.10 - 1.15$ mag. Al igual que los casos de las galaxias NGC 2549, NGC 3414 y NGC 5838, parece observarse aquí un pequeño grupo de candidatos a CGs en $(g' - i')_0 \sim 1.3$ mag.

Para cuantificar y caracterizar la posible presencia de tres subpoblaciones, se aplicó GMM a la distribución de color y el software RMIX a los histogramas (todas las muestras corregidas por contaminación de campo), ajustando en ambos casos una distribución trimodal. Los valores obtenidos por el ajuste de GMM, listados en la Tabla 8.6, indican que una distribución trimodal es tan buena como una bimodal. Por otra parte, los

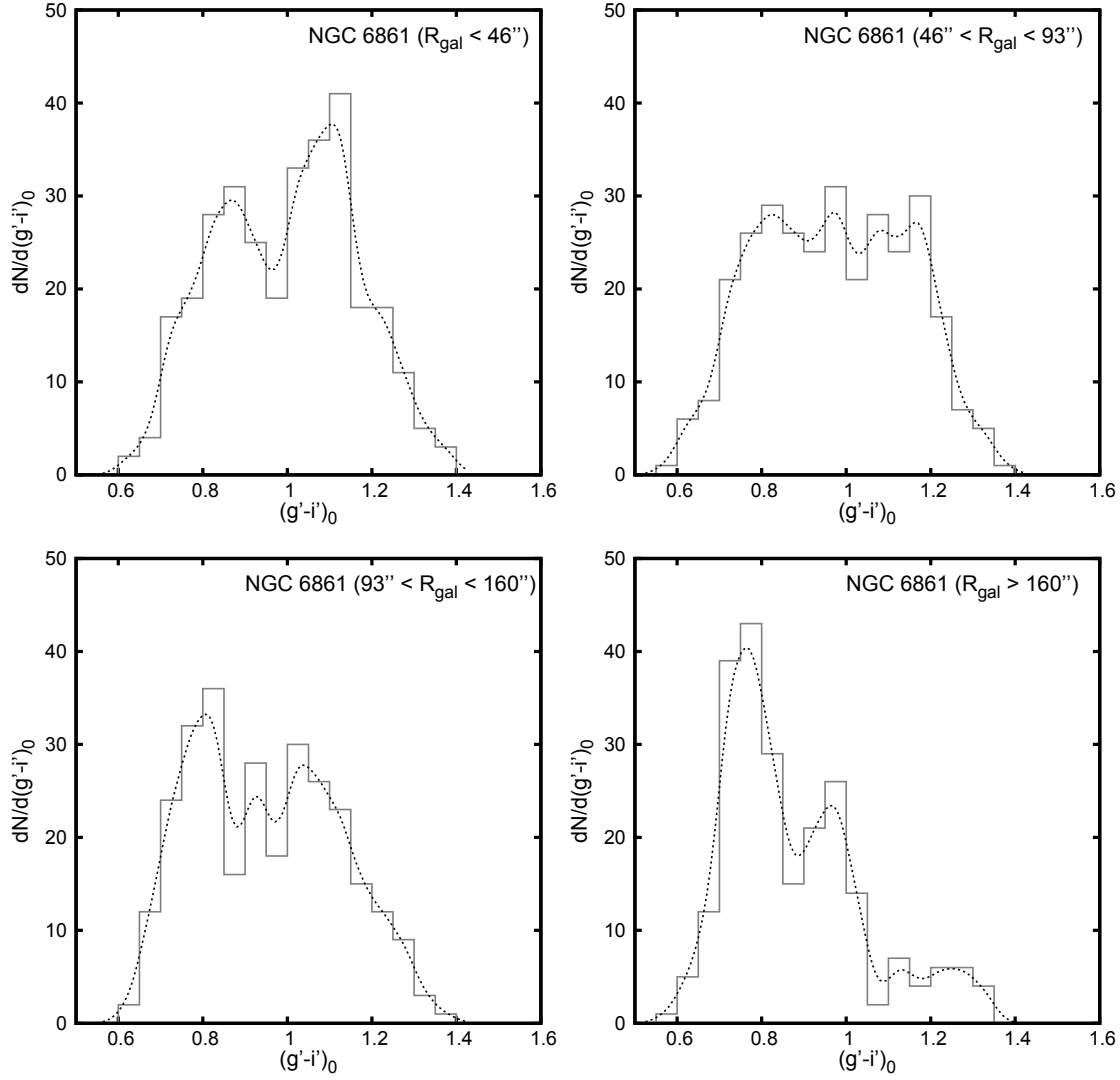


FIGURA 8.12: Histogramas de color corregidos por contaminación para las regiones $R_{\text{gal}} < 46''$, $46'' < R_{\text{gal}} < 93''$, $93'' < R_{\text{gal}} < 160''$ y $R_{\text{gal}} > 160''$ de NGC 6861. En los mismos las líneas punteadas muestran la distribución de color suavizada mediante un kernel gaussiano.

valores reducidos de χ^2 obtenidos por RMIX indican que el caso trimodal brinda un mejor ajuste a los datos que el caso bimodal. La Figura 8.13 muestra el ajuste trimodal obtenido por RMIX sobre el histograma de color.

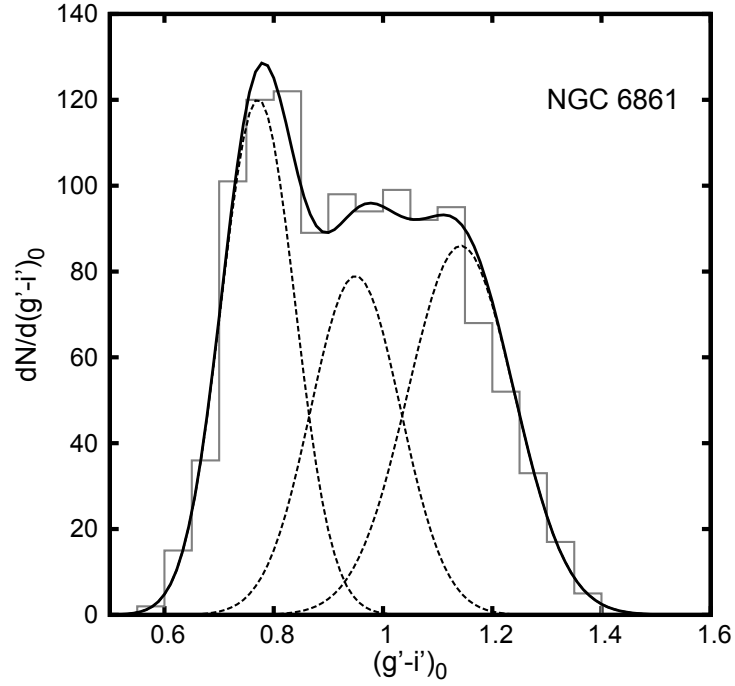


FIGURA 8.13: Histograma de color corregido para NGC 6861. Las líneas de trazos representan el ajuste de tres distribuciones gaussianas obtenido por RMIX.

Algoritmo (Valores estad.)		Subpoblación		
		Azul	Intermedia	Roja
GMM				
Bimodal ($p = 0.01$; $D = 2.63 \pm 0.14$; $k = -0.934$)	μ	0.790 ± 0.020	–	1.070 ± 0.022
	σ	0.080 ± 0.007	–	0.120 ± 0.007
Trimodal ($p = 0.01$; $D = 2.46 \pm 0.34$; $k = -0.934$)	μ	0.783 ± 0.014	0.954 ± 0.062	1.128 ± 0.058
	σ	0.075 ± 0.009	0.066 ± 0.032	0.100 ± 0.022
RMIX				
Bimodal ($\chi^2 = 15.6$)	μ	0.783 ± 0.010	–	1.066 ± 0.014
	σ	0.070 ± 0.006	–	0.130 ± 0.008
	f	0.376 ± 0.023	–	0.624 ± 0.023
Trimodal ($\chi^2 = 5.86$)	μ	0.778 ± 0.020	0.955 ± 0.030	1.136 ± 0.040
	σ	0.070 ± 0.003	0.070 ± 0.020	0.100 ± 0.016
	f	0.379 ± 0.025	0.227 ± 0.140	0.394 ± 0.127

TABLA 8.6: NGC 6861. Valores obtenidos con GMM y RMIX para la distribución de color $(g' - i')_0$. Se listan los valores estadísticos (p , D , k , χ^2) junto con el color medio μ , la dispersión σ y la fracción de objetos (f) asignados por RMIX a cada subpoblación de CGs para el caso bimodal y trimodal.

Capítulo 9

Distribución espacial

9.1 Distribución proyectada sobre el plano del cielo

Es sabido que los eventos de fusión y/o interacción entre galaxias pueden afectar las distribuciones espaciales de las poblaciones estelares, como así también la de las subpoblaciones de CGs (Bonfini et al., 2012). Principalmente, las anisotropías presentadas por las subpoblaciones en algunas galaxias elípticas, han sido utilizadas para investigar acerca de la historia de formación en las mismas. En el caso de las S0 estudiadas aquí, la Figura 9.1 presenta la distribución espacial proyectada de los candidatos a CGs de cada galaxia. Allí se puede observar que, como es esperable, los mismos se concentran principalmente hacia su galaxia anfitriona (triángulo en Fig. 9.1), exhibiendo una distribución más elongada en los casos de NGC 2549 y NGC 5838. Los diferentes signos de interacciones que presentan las galaxias de la muestra (ver Sección 6.2), podrían apreciarse incluso en sus sistemas de CGs, ya que algunas de ellas parecen mostrar sobredensidades y asimetrías e incluso “camino” delineados por sus candidatos.

Diferentes trabajos han abordado en profundidad el estudio de las distribuciones espaciales correspondientes a las poblaciones de cúmulos (Wang et al. 2013; D’Abrusco et al. 2013, 2014; Hargis & Rhode 2014), algunos de ellos, centrándose principalmente en la distribución acimutal de los mismos; ésta se verá con mayor detalle en la siguiente sección.

De acuerdo al análisis realizado de la distribución de color de cada galaxia, en las Figuras 9.2-9.8 se muestran las posiciones de las posibles subpoblaciones de CGs presentes en las mismas. La división entre cada par de subpoblaciones contiguas en color, se realizó adoptando como límite entre ellas el color para el cual las dos funciones gaussianas que las describe, presentan el mismo valor de probabilidad de pertenencia a una u otra. Los parámetros que describen a cada gaussiana son aquellos obtenidos del análisis realizado con GMM y RMIX.

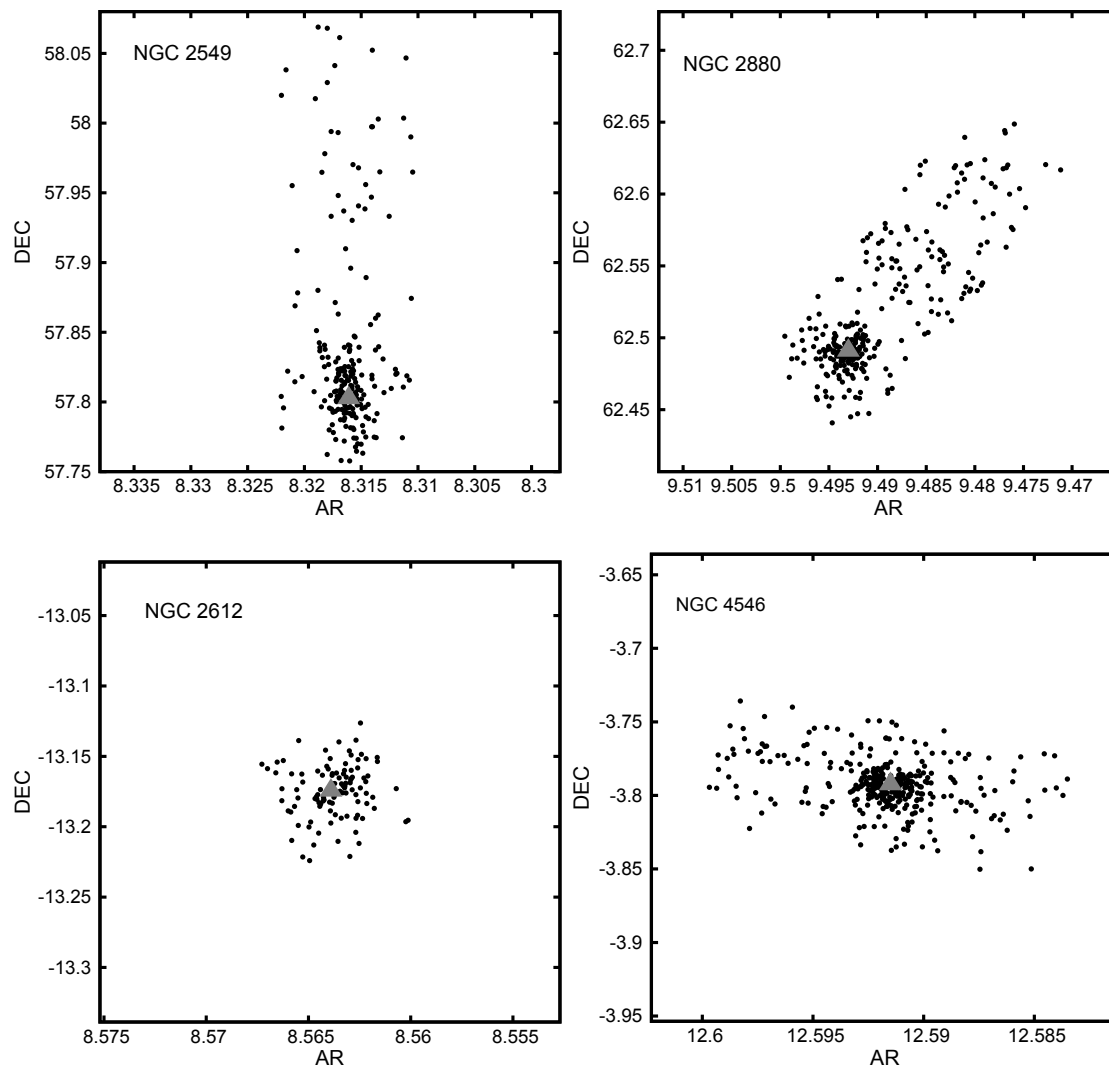


FIGURA 9.1: Distribución espacial de los candidatos a CGs en NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861, respectivamente. El triángulo indica la ubicación de la galaxia. La orientación de los campos es igual a la de la Fig. 3.2.

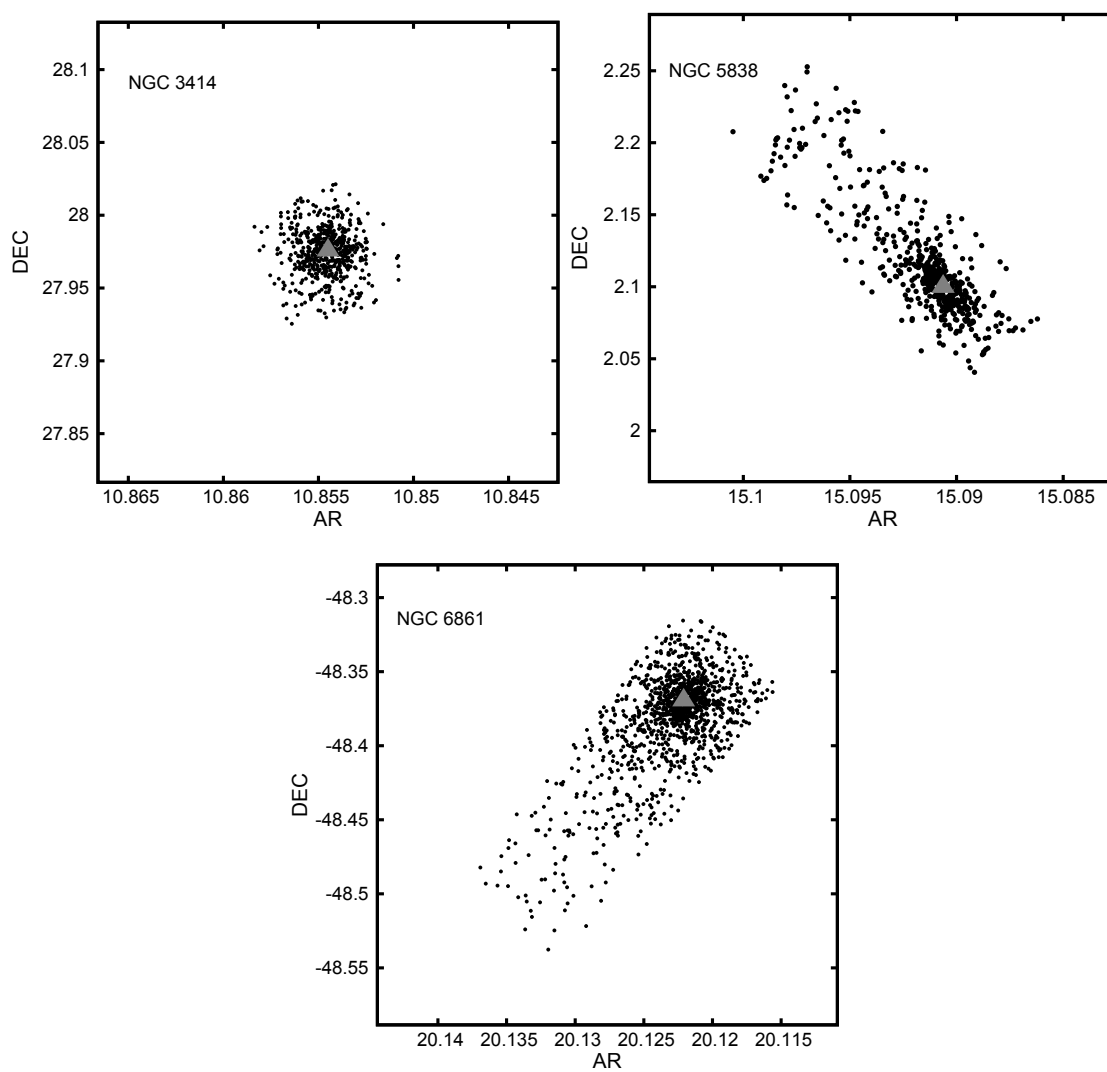


FIGURA 9.1: Continuación.

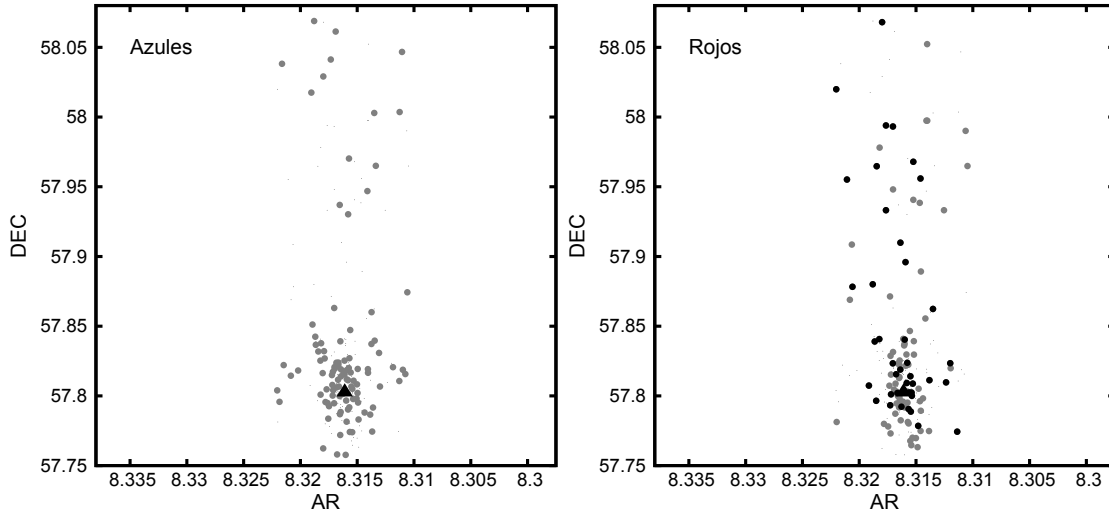


FIGURA 9.2: Distribución espacial proyectada de las subpoblaciones de CGs azul (panel izquierdo) y roja (panel derecho) de NGC 2549. Los puntos negros en el panel derecho representan los candidatos a CGs con colores $(g' - i')_0 > 1.2$ mag.

A continuación, se describe el análisis realizado sobre los diferentes sistemas de CGs.

NGC 2549: los valores obtenidos del ajuste gaussiano a la distribución de color realizado en el Capítulo 8 se utilizaron para separar entre las subpoblaciones azul y roja presentes en esta galaxia. Aquellos objetos que muestran colores más rojos que $(g' - i')_0 > 1.2$ mag fueron incluidos en esta última subpoblación. Los rangos de colores empleados fueron: $(g' - i')_0 < 0.96$ y $(g' - i')_0 \geq 0.96$ mag, para la subpoblación azul y roja, respectivamente.

En la Figura 9.2 se muestra la distribución espacial para ambas subpoblaciones. Como es de esperar, en dicha figura se observa que los candidatos a CGs se encuentran concentrados hacia la galaxia, mostrando en el caso de la subpoblación roja una clara elongación a lo largo del eje mayor de NGC 2549. Los azules, por otro lado, si bien muestran también una clara concentración, se observa que a primera vista el subsistema luce menos elongado. Por su parte, aquellos objetos con colores más rojos mencionados anteriormente (puntos negros en panel derecho de Fig. 9.2), presentan una leve concentración hacia la galaxia (~ 16 candidatos), mientras que el resto se extienden a varios R_{ef} .

NGC 2880: la distribución de color de esta galaxia presenta tres grupos diferentes de candidatos a CGs. Para lograr una separación entre los mismos, se consideraron los siguientes cortes en color: $(g' - i')_0 < 0.71$; $0.71 \leq (g' - i')_0 < 0.97$; $(g' - i')_0 \geq 0.97$ mag, de acuerdo a los valores obtenidos de la Tabla 8.2.

La Figura 9.3 muestra la distribución espacial de los candidatos a CGs de las diferentes subpoblaciones. Allí se observa que los objetos con color $(g' - i')_0 < 0.71$ mag (panel superior izquierdo) no muestran una obvia concentración. Sin embargo, los más

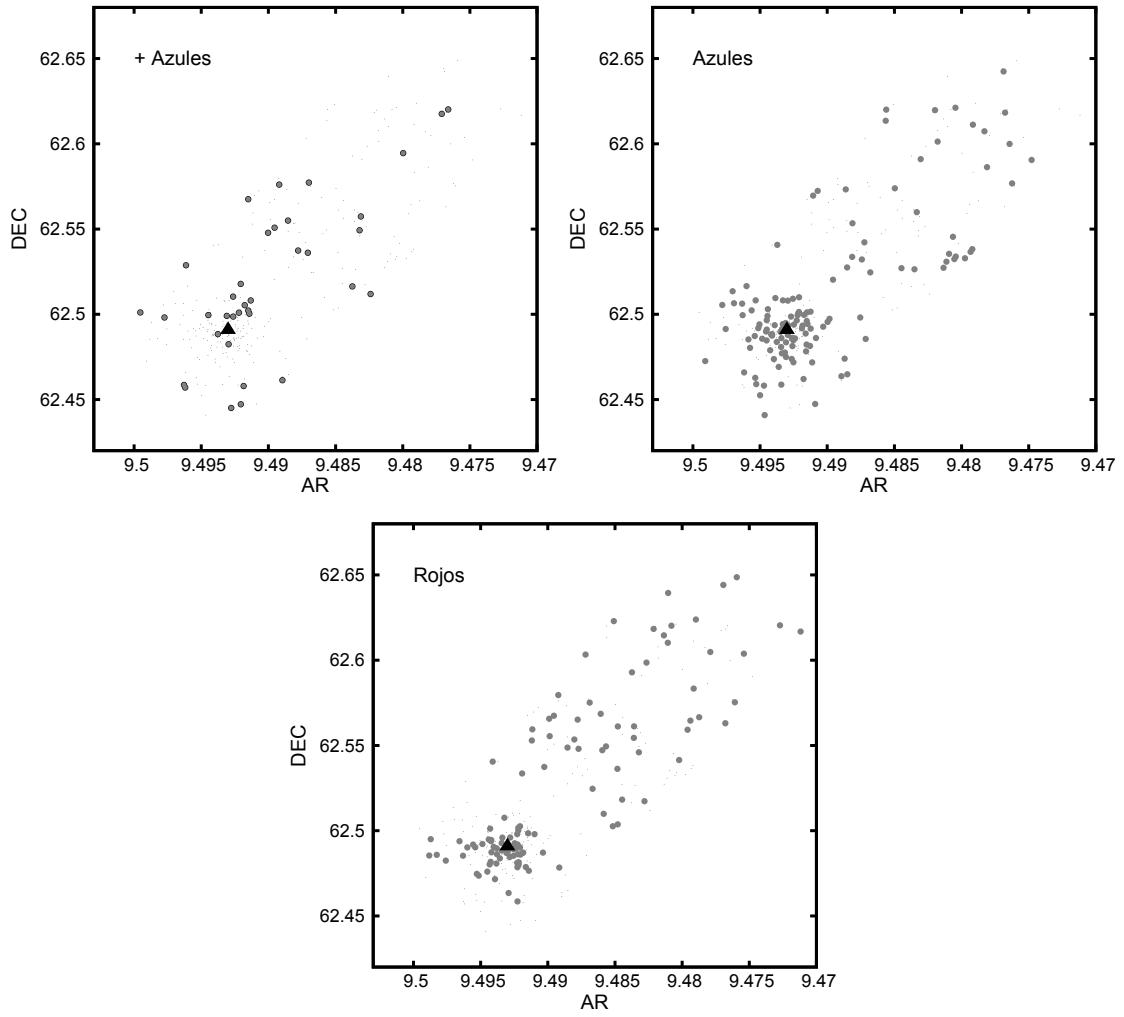


FIGURA 9.3: Distribución espacial proyectada de los candidatos a CGs con colores $(g' - i')_0 < 0.71$ mag (panel superior izquierdo) y las típicas subpoblaciones azul y roja presentes en NGC 2880 (panel superior derecho e inferior).

próximos a NGC 2880 muestran un claro apiñamiento sobre la misma. Por su parte, las subpoblaciones azul y roja se agrupan mayormente hacia la galaxia como es de esperar, presentando en menor medida una distribución sobre todo el mosaico. A diferencia de lo que se observa en NGC 2549, aquí no se observa una elongación obvia en ninguno de los subsistemas de CGs. Sin embargo, se observa un cierto déficit de CGs en los radios galactocéntricos 80 y 200 segundos de arco. Se analizará dicho déficit en la Sección 9.2. En los siguientes análisis realizados en esta Tesis sobre las subpoblaciones de CGs de NGC 2880, dado el bajo número de objetos que presentan colores más azules que 0.71, los mismos fueron considerados conjuntamente con la subpoblación azul.

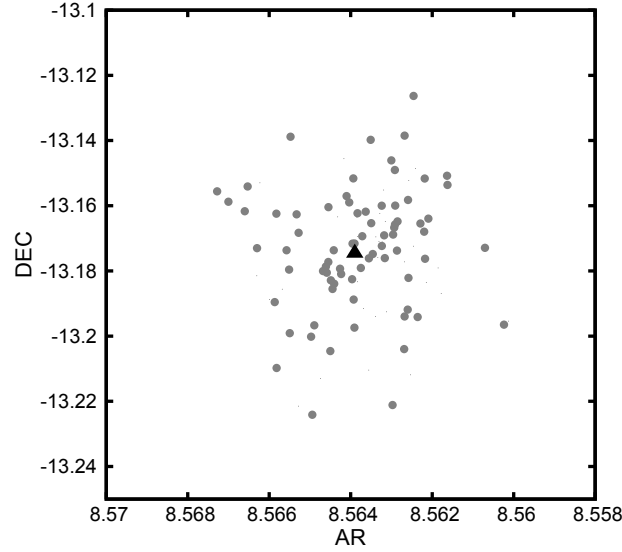


FIGURA 9.4: Distribución espacial proyectada de los candidatos a CGs en NGC 2612 con colores en el rango $0.6 < (g' - i')_0 < 1.2$ mag.

NGC 2612: como se mostró en el Capítulo 8, no fue posible separar mediante el análisis de su distribución de color, las diferentes subpoblaciones que presentaría esta galaxia. Por ello, se muestra solamente la distribución espacial de los candidatos más firmes a CGs con colores dentro del rango $0.6 < (g' - i')_0 < 1.2$ mag. En la Figura 9.4 se aprecia que el sistema podría ser elongado, cosa que se intentará confirmar en la Sección 9.2.

NGC 4546: debido a que esta galaxia mostraba una distribución trimodal en el color $(g' - z')_0$, se decidió utilizar este color para separar a las subpoblaciones de CGs azul, intermedia y roja de acuerdo a los valores $(g' - z')_0 \leq 1.01$; $1.01 < (g' - z')_0 \leq 1.23$; $(g' - z')_0 > 1.23$ mag, respectivamente. Como se observa en la Figura 9.5 la subpoblación azul presenta una leve concentración hacia la galaxia y una distribución más homogénea sobre el mosaico. También muestra que, como ya se dijo, claramente la población azul llena todo el mosaico. Por su parte, la distribución espacial observada para las subpoblaciones intermedia y roja muestran una clara concentración hacia NGC 4546. La particularidad observada en esta última subpoblación, es la baja dispersión espacial mostrada por sus candidatos a CGs, obteniéndose que el 82% de los mismos se encuentran dentro de 100 segundos de arco de radio galactocéntrico (~ 6.4 kpc). Por otro lado, en esta subpoblación también se aprecia la existencia de un posible “camino” de candidatos a CGs hacia el oeste de NGC 4546 (dirección sur-norte), los cuales podrían ser una evidencia de la interacción o fusión que ha sufrido esta galaxia con un objeto de menor masa. Para corroborar esta “secuencia” de candidatos a CGs, sería necesario realizar un análisis cinemático de los mismos. Este tipo de estudio ha permitido identificar una estructura similar entre las galaxias NGC 4365 (E) y NGC 4342 (S0) (Blom et al., 2014).

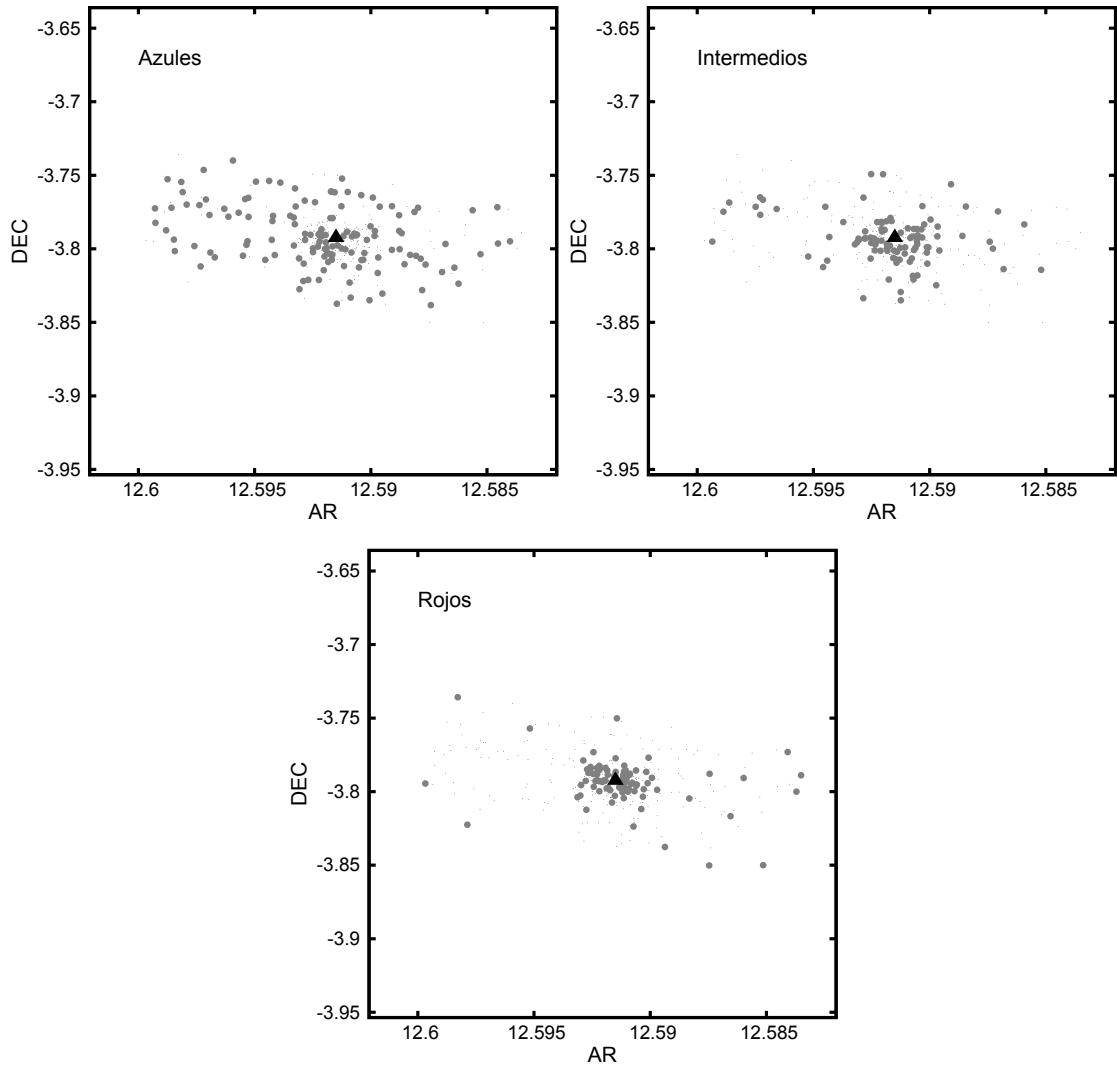


FIGURA 9.5: Distribución espacial proyectada de las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 4546.

NGC 3414: las distribuciones de color en función del radio galactocéntrico presentadas en el Capítulo 8 (Fig. 8.10) para esta galaxia, muestran la presencia de diferentes subpoblaciones además de las clásicas azul y roja. La separación en color de las mismas se realizó considerando los siguientes intervalos: $(g' - i')_0 \leq 0.82$; $0.82 < (g' - i')_0 \leq 1.01$; $1.01 < (g' - i')_0 \leq 1.2$ y $(g' - i')_0 > 1.2$ mag. Como se observa en la Figura 9.6, la distribución espacial de los CGs azules y rojos es la esperada para este tipo de subpoblaciones. En particular, los CGs rojos parecen mostrar un “core”, el cual debe ser confirmado mediante el análisis de las distribuciones de densidad. Por su parte, los CGs con colores intermedios parecen compartir características con las subpoblaciones antes mencionadas, dado que si bien poseen una concentración hacia el centro de la galaxia, también se encuentran distribuidos sobre todo el campo GMOS. Dicho comportamiento se debe posiblemente a la contribución de las subpoblaciones contiguas en color. Por último, los candidatos a CGs con colores $(g' - i')_0 > 1.2$ mag presentan una clara

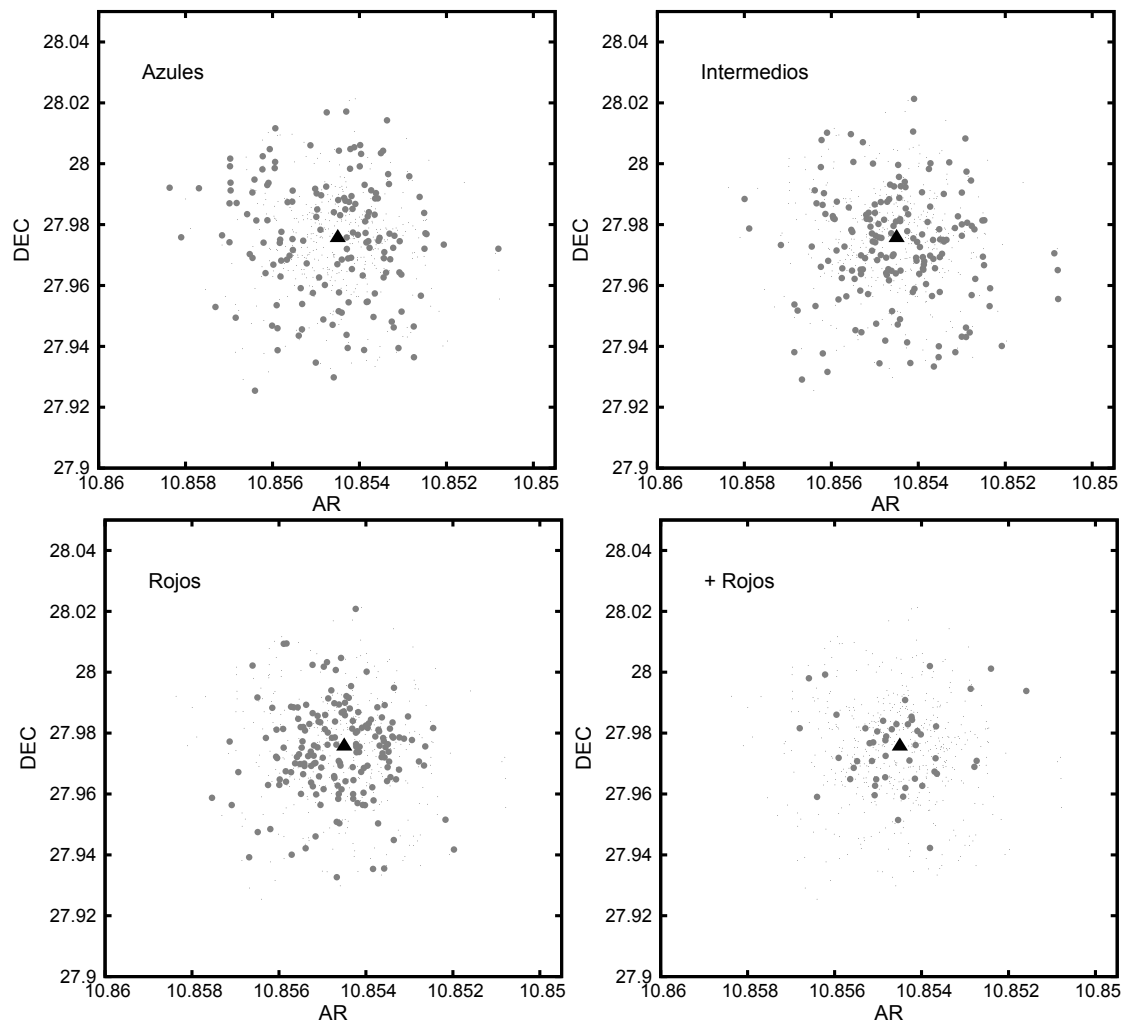


FIGURA 9.6: Distribución espacial proyectada de las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 3414. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, se encuentra la subpoblación azul, intermedia, roja y con colores más rojos.

concentración hacia el centro de NGC 3414, lo cual confirma su naturaleza de CGs asociados a dicha galaxia. El color más rojo que el pico de la subpoblación clásica roja de este grupo de CGs, puede estar originado en enrojecimiento debido a la presencia del polvo, y/o ser el producto de la formación de los mismos en base a material muy enriquecido (proveniente de fusiones con galaxias vecinas).

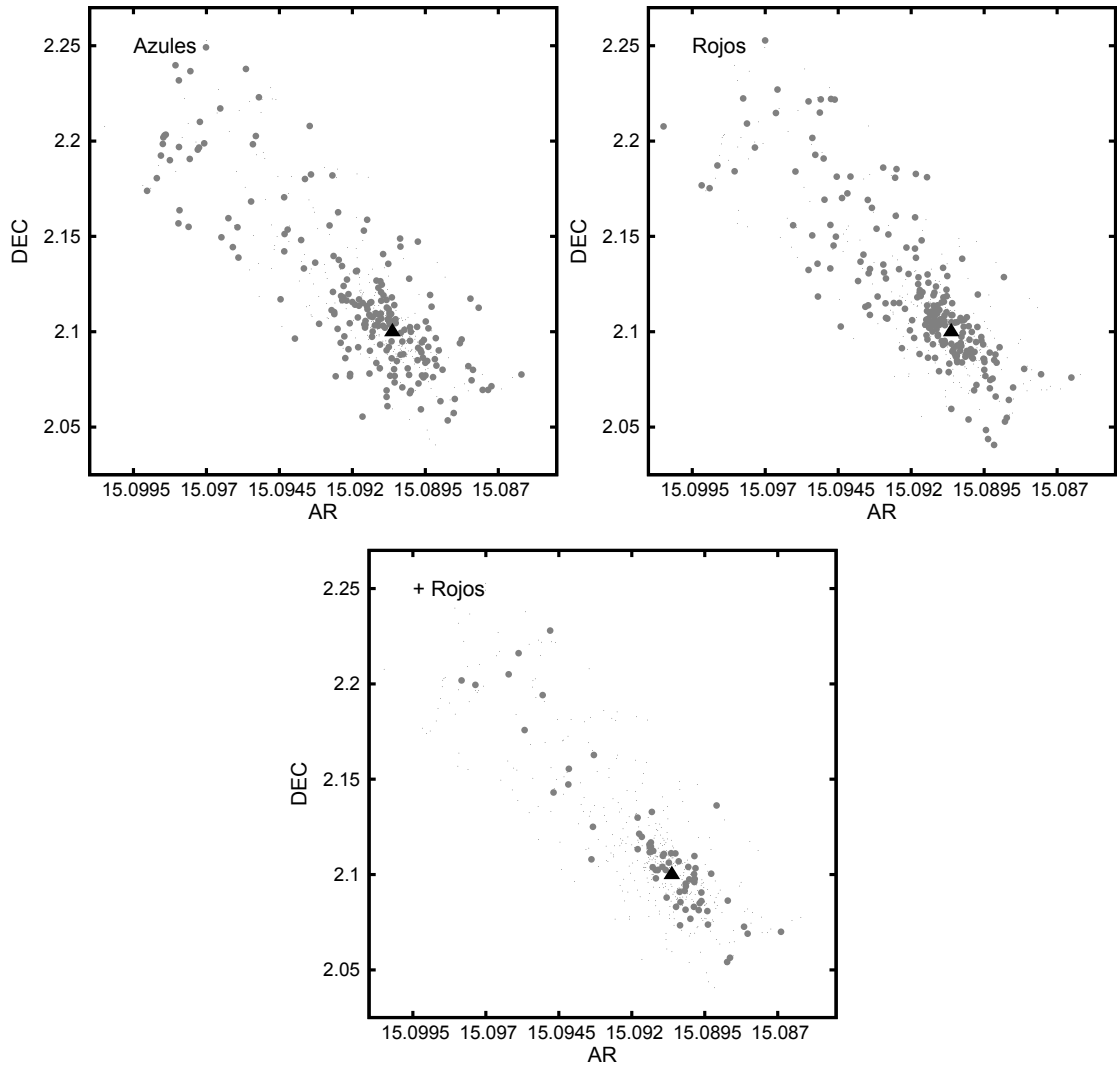


FIGURA 9.7: Distribución espacial proyectada de la subpoblación de CGs azul (panel superior izquierdo), roja (panel superior derecho) y aquella que presenta colores más rojos (panel inferior), en NGC 5838.

NGC 5838: el histograma de color de esta galaxia presenta una clara distribución trimodal, por ello se utilizaron los siguientes cortes en color para separar las diferentes subpoblaciones de CGs: $(g' - i')_0 \leq 0.91$; $0.91 < (g' - i')_0 < 1.21$; $(g' - i')_0 \geq 1.21$ mag. En la Figura 9.7 se observa que los candidatos a CGs azules se extienden a lo largo de todo el mosaico, en particular presentando un agrupamiento hacia el Noreste de la galaxia. Por su parte, la subpoblación roja y aquella con colores más rojos, muestran una distribución elongada a lo largo del eje mayor de NGC 5838. Como se mencionó en el Capítulo 8, la existencia de CGs con estos colores particularmente rojos, puede deberse a efectos de enrojecimiento interno por parte de la galaxia, y/o a la existencia de una subpoblación muy rica en metales formada en un tercer evento de formación de CGs. Es de destacar que, si bien en NGC 3414 se intuye la presencia de un grupo de CGs más rojos que la población clásica roja, en el caso de NGC 5838 ésta es mucho más clara.

NGC 6861: la distribución de color de esta galaxia presenta un mejor ajuste considerando una distribución trimodal. Por ello, se decidió separar la muestra de candidatos a CGs en tres subpoblaciones, de acuerdo a los siguientes rangos de colores obtenidos por los algoritmos GMM y RMIX: $(g' - i')_0 \leq 0.88$; $0.88 < (g' - i')_0 \leq 1.01$; $(g' - i')_0 > 1.01$ mag. En la Figura 9.8 se aprecia una significativa diferencia en la distribución espacial entre los candidatos azules y rojos. Estos últimos lucen más concentrados y aplanados, parecido a la distribución de luz estelar de NGC 6861 (ver Sección 9.2). Por su parte, la subpoblación intermedia parece mostrar una concentración hacia la galaxia, similar a los candidatos rojos.

Con el propósito de ver si existe algún indicio de subestructura en la distribución espacial de los candidatos a CGs de esta galaxia, se analizó la apariencia de los diagramas espaciales considerando candidatos en diferentes intervalos de color $(g' - i')_0$. Este ejercicio ha demostrado que los candidatos a CGs con $(g' - i')_0 > 1.16$ mag presentan una distribución asimétrica alrededor del centro de NGC 6861. En el panel inferior derecho de la Fig. 9.8, se grafican los respectivos candidatos. Para cuantificar esta asimetría, se realizó una sencilla prueba: se consideraron objetos con $30 < R_{\text{gal}} < 160$ segundos de arco (cobertura areal completa), y se realizaron conteos de los mismos dividiendo la muestra entre el lado izquierdo (sureste) y el lado derecho de la galaxia (noroeste), obteniendo 69 y 35 candidatos, respectivamente. Estos números muestran que hay dos veces más candidatos hacia el sureste de la galaxia que hacia el noroeste. Esto no podría ser efecto de la contaminación debido a que, de acuerdo al análisis del campo de comparación, se esperan pocos objetos contaminantes en el área (< 10). Inhomogeneidades en la distribución espacial de los CGs fueron reportadas en otras galaxias de tipo temprano, tales como NGC 4261, NGC 4649 y NGC 4278 (D'Abrusco et al. 2013, 2014). Estas características, al igual que los remanentes fósiles, sugieren la acreción y/o fusión de vecinos de menor masa.

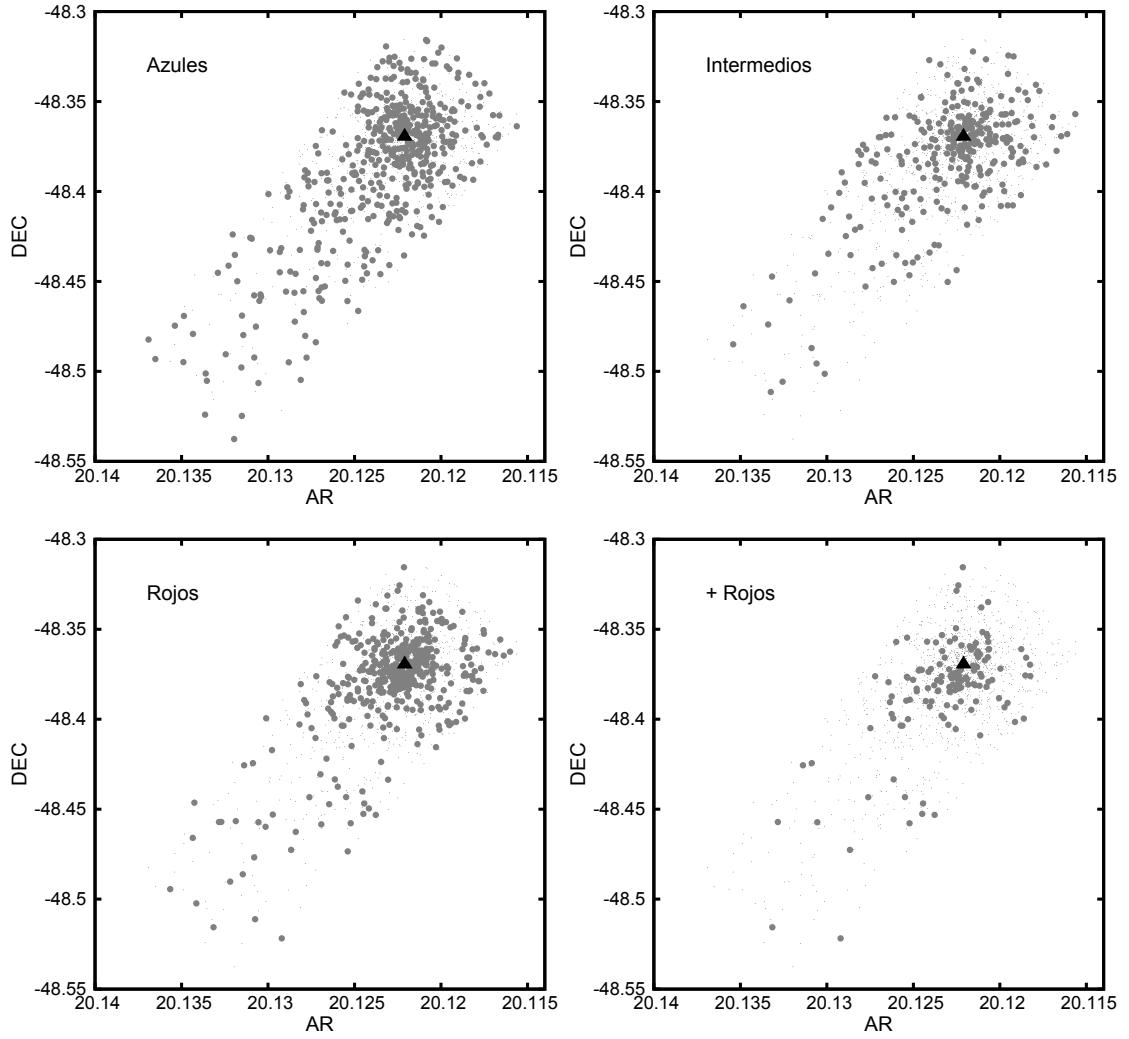


FIGURA 9.8: Distribución espacial proyectada de las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 6861. Los paneles superiores corresponden a las subpoblaciones azul e intermedia. Los paneles inferiores corresponden a la subpoblación roja y a los candidatos a CGs con colores más rojos que $(g' - i')_0 > 1.16$ mag.

9.2 Distribución acimutal y perfiles de densidad

Para cuantificar las distribuciones espaciales de los distintos sistemas de CGs, se analizaron las distribuciones acimutales y se obtuvieron los perfiles de densidad proyectada de cada uno de ellos, así como de las diferentes subpoblaciones de cúmulos presentes en las mismas. Esto último sólo se realizó en las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861 debido a que sus subpoblaciones presentaban un número adecuado de objetos. Como se mencionó anteriormente, algunos de estos sistemas presentan una distribución espacial elongada en sus candidatos, por ello se decidió utilizar la siguiente metodología para la construcción de los perfiles de densidad.

En primer lugar, se obtuvieron las distribuciones radiales unidimensionales realizando el conteo de los candidatos en anillos circulares concéntricos. Los mismos fueron corregidos

por contaminación (ver Sección 7.2) y por completitud areal en aquellos casos en que el anillo considerado supera el límite físico del mosaico de GMOS. En todos los casos, las incertezas en la densidad superficial vienen dadas por la estadística de Poisson. La construcción de los perfiles se llevó a cabo utilizando pasos entre $\Delta \log r = 0.10 - 0.12$, excepto en el caso de NGC 2612, en la cual se utilizó un paso más grande ($\Delta \log r = 0.15$) debido al bajo número de candidatos a CGs que presenta.

La Figura 9.9 muestra los perfiles de densidad construidos con anillos circulares, previa y posterior a la corrección por contaminación (círculos vacíos y círculos llenos, respectivamente). Sobre estos últimos, se ajustaron dos funciones: una ley de potencia de la forma $\log(\rho) = a + b \log(r)$, y una ley de de Vaucouleurs $\log(\rho) = c + d(r^{1/4})$, ambas son utilizadas comúnmente en sistemas de CGs (Forte et al. 2001, 2005; Bassino et al. 2006; Faifer et al. 2011). Dicho ajuste se realizó evitando la región más externa, dado el bajo número de candidatos y en la cual comienza a dominar la contaminación, como así la parte más interna ya que presenta un perfil diferente (líneas punteadas verticales en Fig. 9.9 delimitan la región considerada para el ajuste). Al observar el perfil de densidad de NGC 2880, se observa un déficit de objetos entre $80 < R_{\text{gal}} < 200$ segundos de arco ($8.5 < R_{\text{gal}} < 21.2$ kpc), lo cual ya se evidenciaba en el gráfico correspondiente a la distribución espacial (Fig. 9.1). Esto constituye un resultado notable, ya que evidentemente indica la presencia de una estructura espacial que podría ser el resultado de un evento de fusión importante. Sin embargo, dado que el mosaico de imágenes con el que se cuenta no permite un cubrimiento areal completo, este resultado debe tomarse con cautela. Debido a la presencia del mencionado déficit se optó por realizar los ajustes de las diferentes funciones sobre el perfil de densidad, excluyendo dichas zonas, y evitar así una pendiente muy pronunciada de las mismas.

En la Tabla 9.1 se muestran los valores de las pendientes obtenidos para cada función, resultando similares¹ a los encontrados en otros trabajos (Kissler-Patig et al. 1997; Hargis & Rhode 2012, y trabajos antes mencionados) relacionados a galaxias de tipo temprano. Es de destacar, sin embargo, la notable diferencia en los valores de las pendientes mostradas por NGC 2880 y NGC 6861, con respecto a las demás. En estas dos galaxias, el sistema aparece mucho menos concentrado que en las otras. Por otro lado, la mayor pendiente se observa en NGC 4546. Sin embargo, dado que resulta claro que hemos restado en exceso candidatos en la zona externa, esta pendiente podría, en realidad, ser un poco menor.

Para determinar la orientación y elongación de los sistemas y subpoblaciones de CGs, se realizaron conteos de los candidatos en anillos circulares ($36 < R_{\text{gal}} < 146$ segundos de arco) centrados en las galaxias, dividiendo los mismos en sectores de 22.5° , excepto en el caso de NGC 2612 donde se utilizó una separación mayor (sectores de 25.7°). El

¹La comparación entre valores de las pendientes en los perfiles de densidad resulta independiente de la distancia.

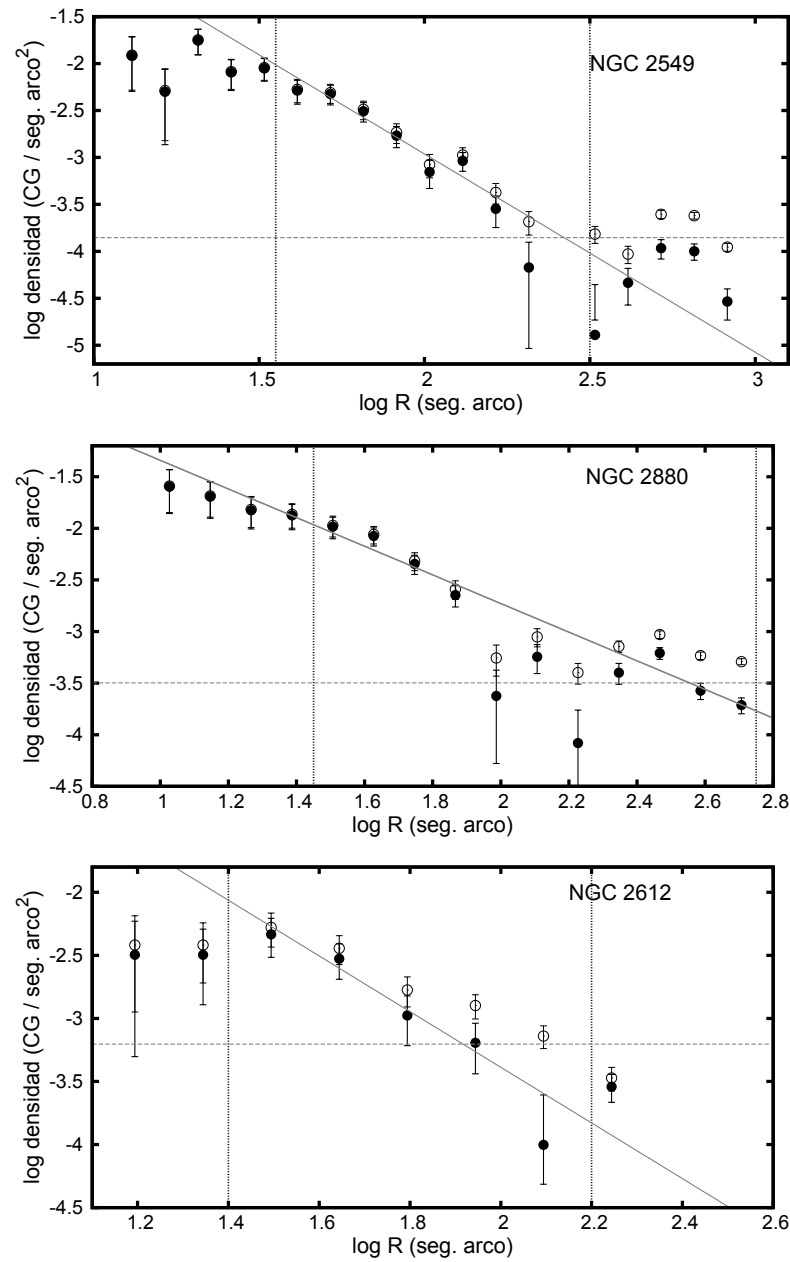


FIGURA 9.9: Perfiles de densidad corregidos por contaminación y completitud areal considerando anillos circulares. Los mismos corresponden a los sistema de CGs de NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861. Los círculos vacíos y llenos representan el perfil previo y posterior a la corrección por contaminación, respectivamente. Las barras de error corresponden al error poissoniano de los datos. Las líneas punteadas verticales y la línea de trazos horizontal representan los límites considerados para los ajustes y el nivel de contaminación esperado, respectivamente.

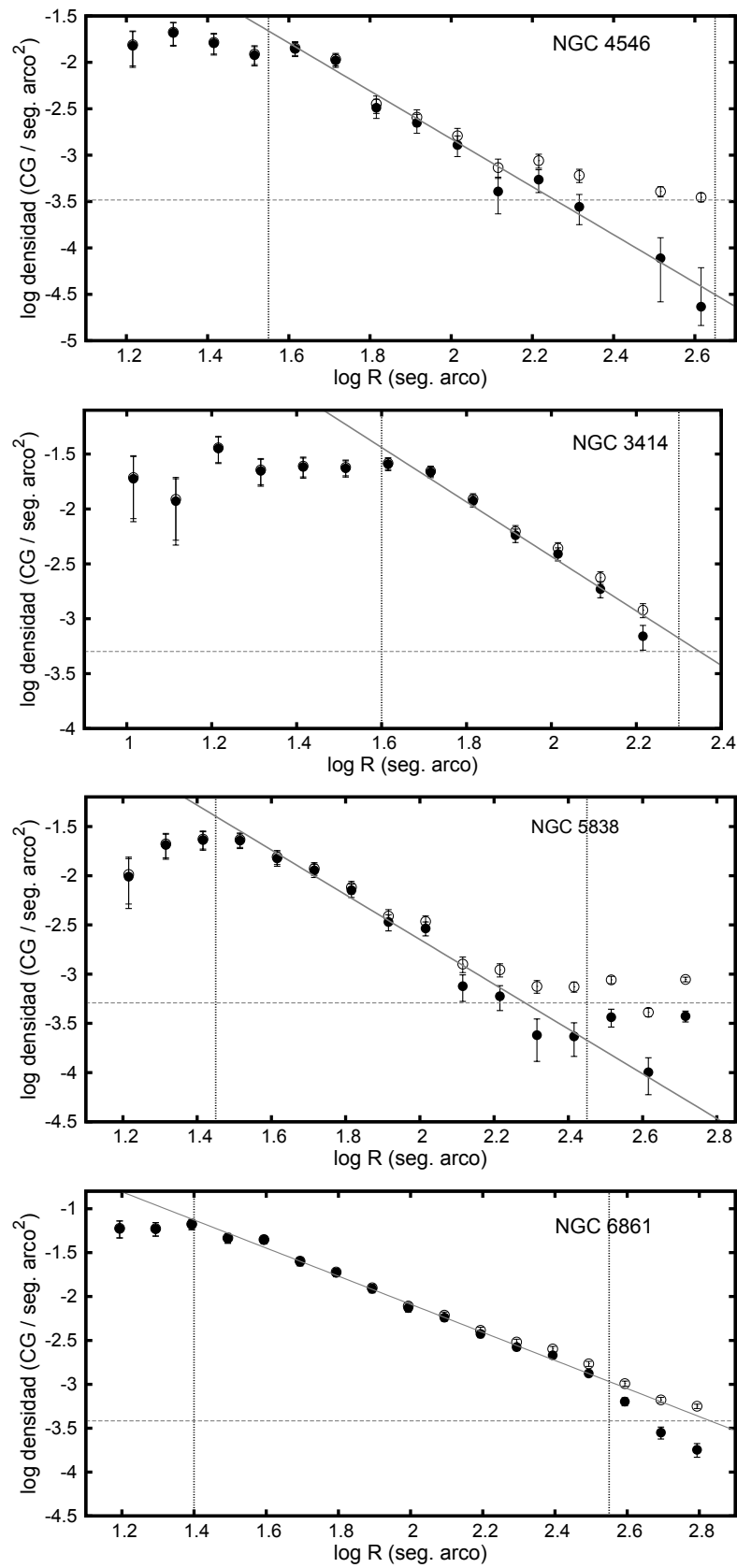


FIGURA 9.9: Continuación

Galaxia	Pot. (circ)	de Vauc. (circ)	Pot. (elíp)	de Vauc. (elíp)
NGC 2549	-2.11 ± 0.28	-1.19 ± 0.11	-2.26 ± 0.14	-1.24 ± 0.08
NGC 2880	-1.38 ± 0.15	-0.72 ± 0.06	-1.68 ± 0.17	-0.91 ± 0.09
NGC 2612	-2.20 ± 0.31	-1.41 ± 0.17	-2.20 ± 0.32	-1.48 ± 0.28
NGC 4546	-2.58 ± 0.15	-1.41 ± 0.09	-2.42 ± 0.11	-1.41 ± 0.07
NGC 3414	-2.48 ± 0.19	-1.45 ± 0.08	-2.33 ± 0.24	-1.35 ± 0.12
NGC 5838	-2.27 ± 0.15	-1.31 ± 0.07	-1.88 ± 0.16	-1.13 ± 0.08
NGC 6861	-1.60 ± 0.04	-0.87 ± 0.03	-1.59 ± 0.04	-0.96 ± 0.03

TABLA 9.1: Valores de las pendientes obtenidos en cada galaxia, mediante el ajuste de una ley de potencia y una ley de de Vaucouleurs, sobre los perfiles de densidad considerando anillos circulares (columnas 2-3) y elípticos (columnas 4-5).

radio interno del anillo fue escogido para evitar la baja completitud de objetos en las regiones cercanas a los centros galácticos, mientras que la elección del radio externo se hizo para abarcar la mayor área posible del sistema, sin caer fuera de la zona muestreada del mosaico, y evitar así correcciones por incompletitud areal en los conteos.

En la Figura 9.10 se muestran los histogramas del análisis acimutal para cada sistema y subpoblación de CGs. Sobre ellos, se utilizó la expresión de McLaughlin et al. (1994), para determinar los valores de elipticidad y ángulo de posición (AP) en cada uno. Dicha expresión viene dada por:

$$\sigma(R, \theta) = kR^{-\alpha} [\cos^2(\theta - AP) + (1 - e^2)^{-2} \sin^2(\theta - AP)]^{-\alpha/2} \quad (9.1)$$

siendo σ en número de candidatos a CGs, θ el ángulo de posición medido en sentido antihorario desde el norte, e la elipticidad y α el valor del exponente de la ley de potencia obtenido en el ajuste del perfil de densidad considerando anillos circulares (ver Tabla 9.1).

En ningún caso se sustrajo el valor de la contaminación esperada en cada sector angular debido al bajo número que ésta representa ($\sim 1 - 2$ objetos), y que, por lo tanto, es de esperar que no influya sobre el ajuste.

La Tabla 9.2 lista los valores obtenidos de los parámetros de la Expresión 9.1, y los correspondientes de cada galaxia obtenidos de la literatura. Allí se observa que varios de los sistemas de CGs presentan una elipticidad elevada (excepto en el caso de NGC 3414), resultando similar a la exhibida por la componente estelar de su galaxia anfitriona. De igual manera ocurre al comparar los valores de los AP entre los candidatos y las galaxias, resultando idénticos en los casos de NGC 2549, NGC 4546, NGC 5838 y NGC 6861, mientras que en los restantes son comparables dentro de los errores. La notable similitud que surge en los valores mencionados, muestra que existe una clara relación entre los sistemas de CGs y la componente estelar de las galaxias.

Con el fin de obtener una representación más fidedigna de la distribución radial en estos sistemas, se volvieron a determinar los perfiles de densidad utilizando, en esta

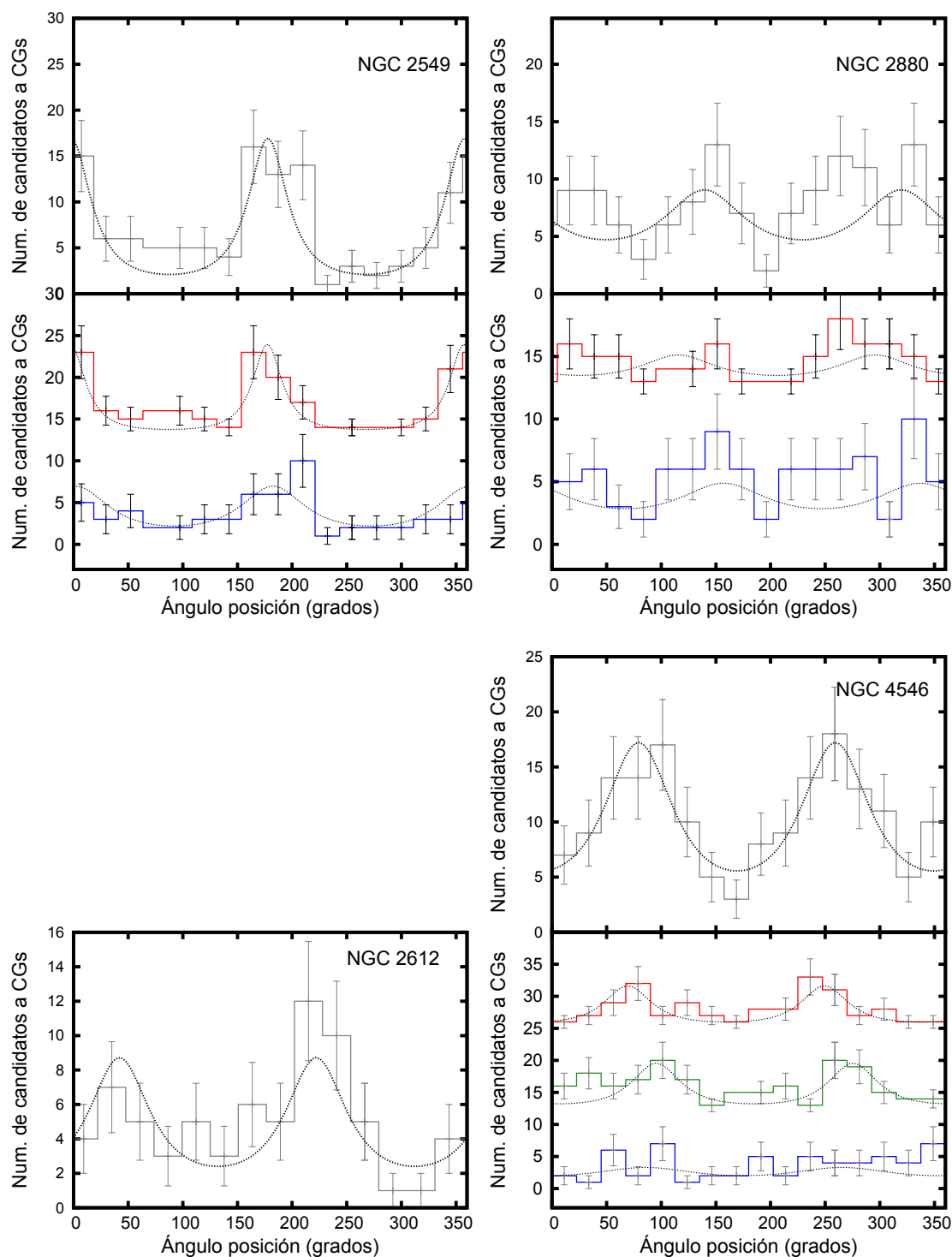


FIGURA 9.10: Distribución acimutal de los candidatos a CGs para las galaxias NGC 2549, NGC 2880, NGC 2612, NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861, respectivamente. Las líneas punteadas muestran los ajustes obtenidos mediante la expresión 9.1. Los histogramas azules, verdes, rojos y magenta, representan a la subpoblación azul, intermedia, roja y con colores más rojos, respectivamente.

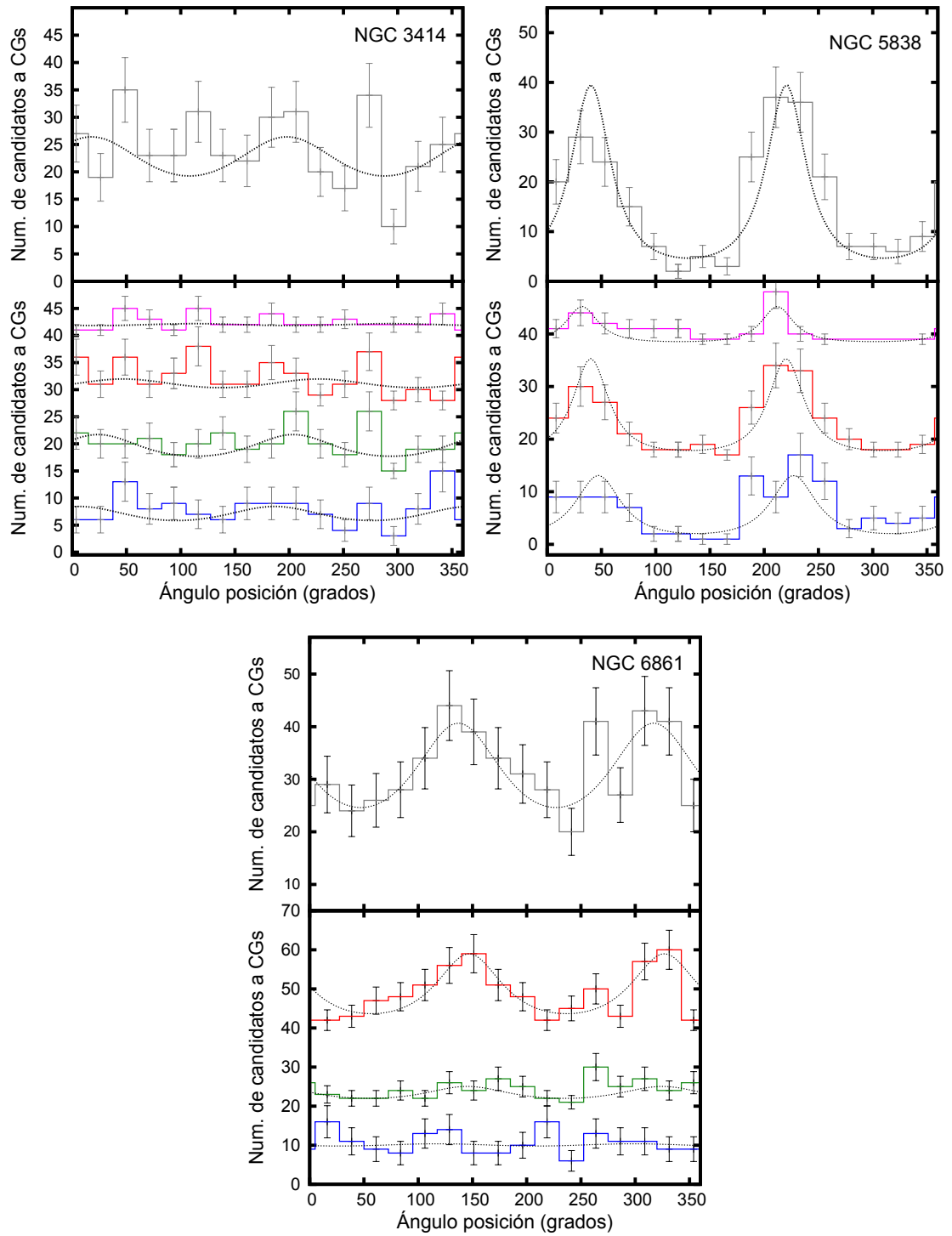


FIGURA 9.10: Continuación

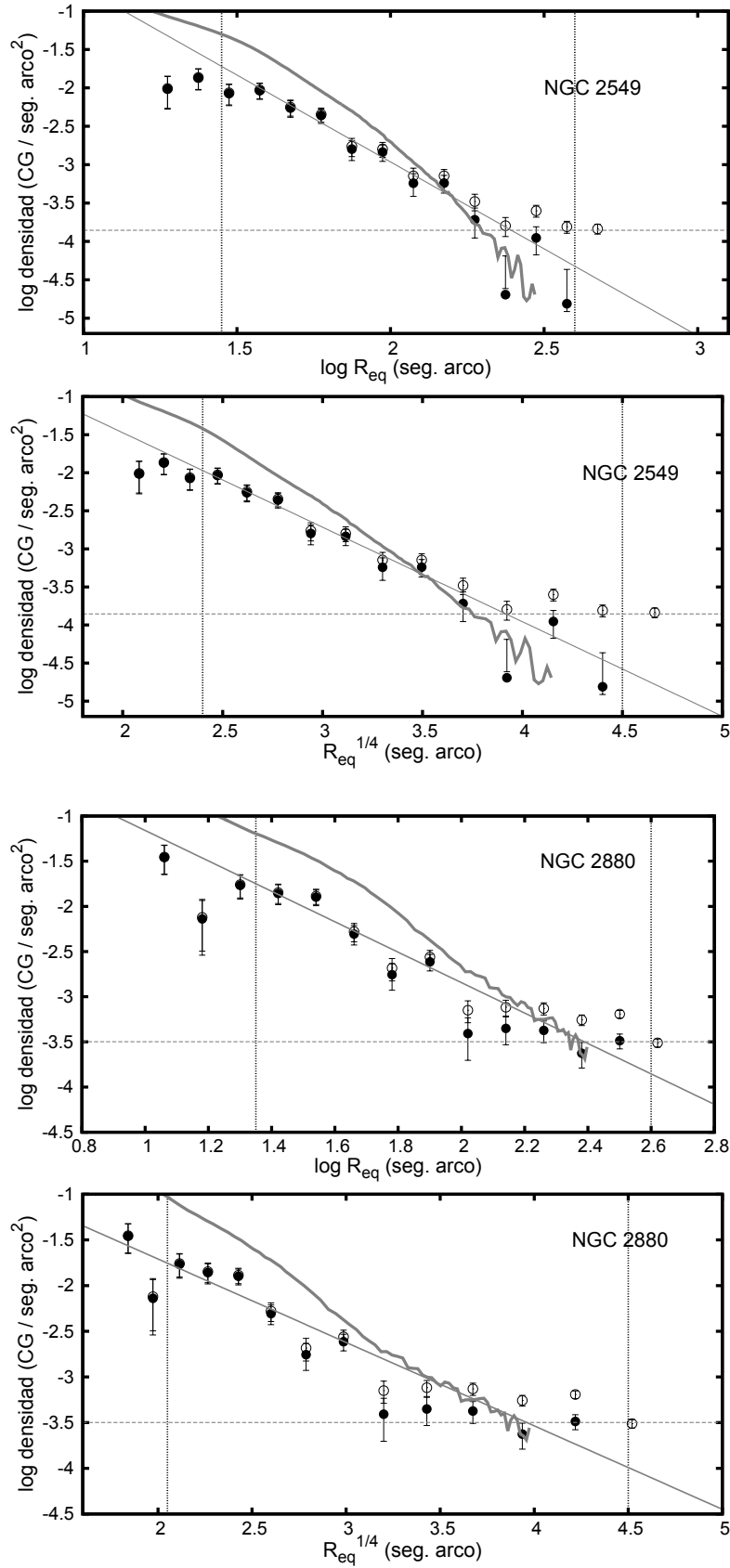


FIGURA 9.11: Perfiles de densidad corregidos por contaminación y completitud areal considerando anillos elípticos, de acuerdo a los valores de e y AP estimados en el análisis acimutal. En todas las galaxias se ajustaron una ley de potencia y una ley de de Vaucouleurs. La línea continua gris muestra el perfil de brillo de la galaxia. Las líneas punteadas verticales y la línea de trazos horizontal indican los límites utilizados para los ajustes y el nivel de contaminación esperado, respectivamente.

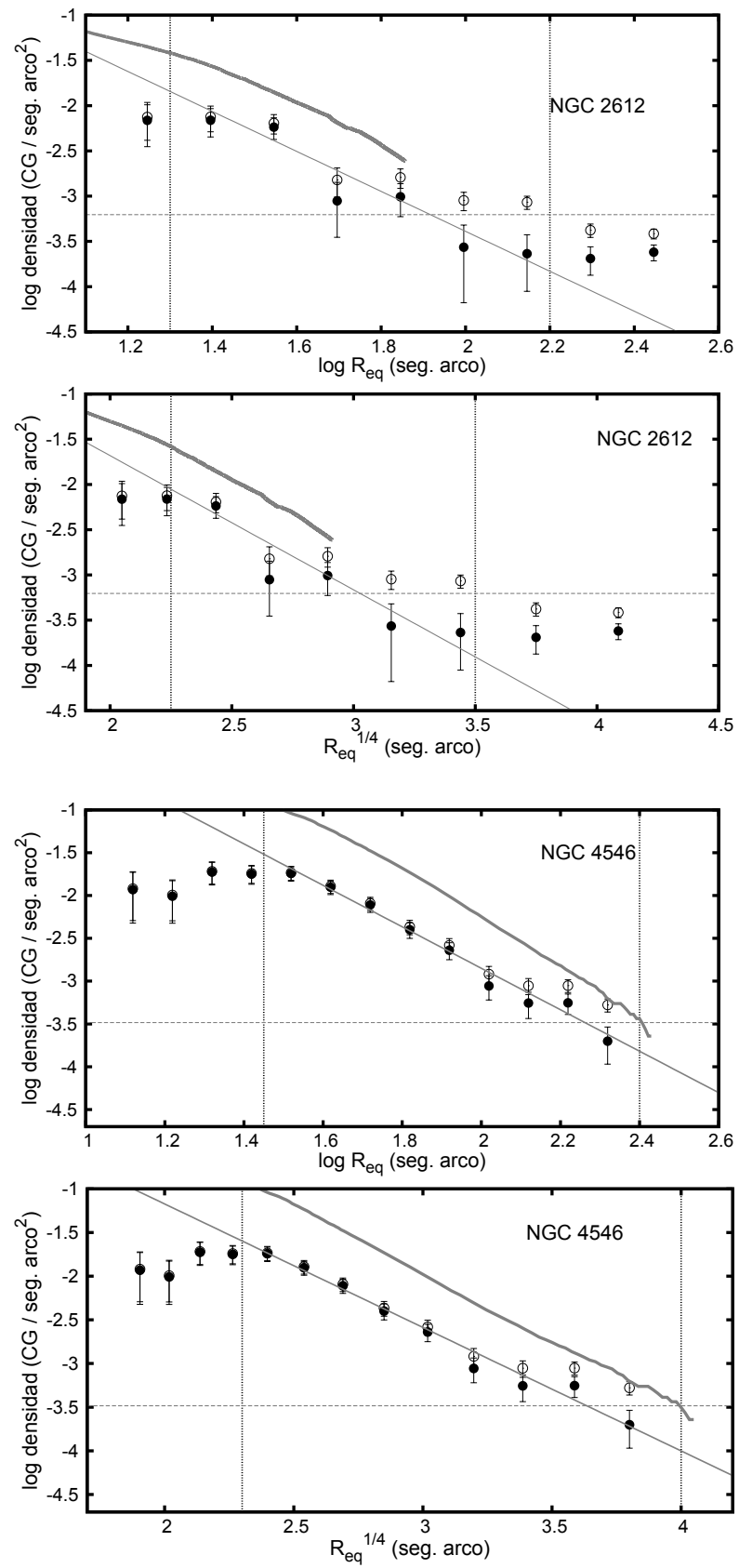


FIGURA 9.11: Continuación

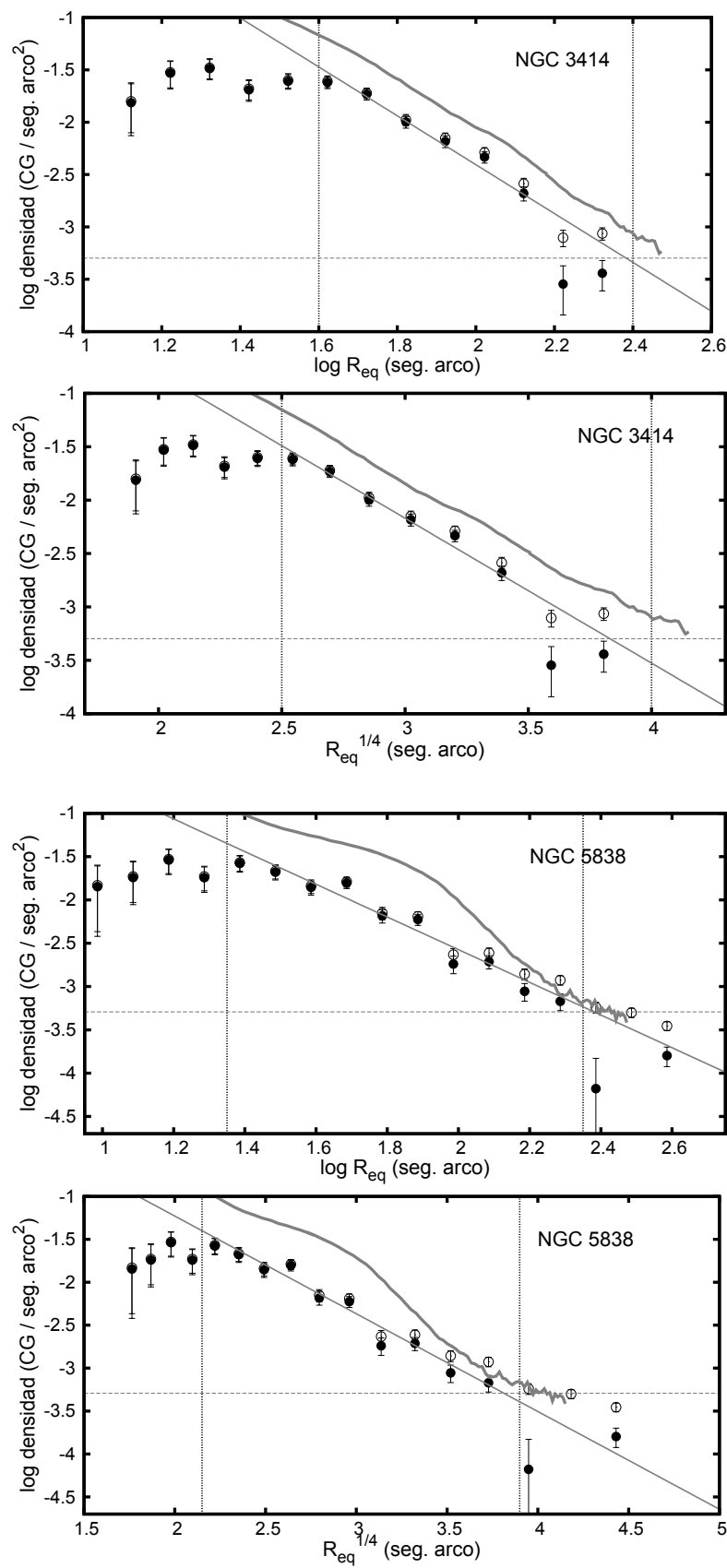


FIGURA 9.11: Continuación

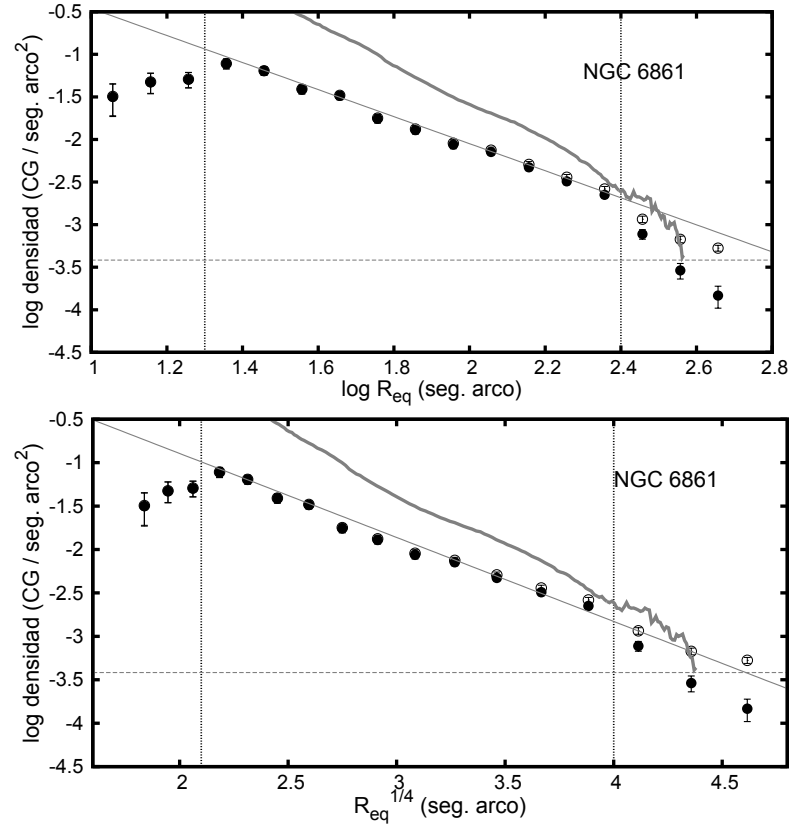


FIGURA 9.11: Continuación

Galaxia	AP (grados)	e	AP _G (grados)	e_G
NGC 2549	178 ± 3.5	0.79 ± 0.04	178	0.80
NGC 2880	139 ± 16	0.61 ± 0.14	145	0.46
NGC 2612	132 ± 6.6	0.66 ± 0.06	$117^{(L)}$	0.79
NGC 4546	79 ± 4.3	0.60 ± 0.03	77	0.56
NGC 3414	18 ± 20.5	0.35 ± 0.11	$9.4^{(L)}$	0.28
NGC 5838	40 ± 3.0	0.78 ± 0.03	42	0.65
NGC 6861	137 ± 6.0	0.52 ± 0.05	138	0.45

TABLA 9.2: Valores de ángulo de posición (AP) y elipticidad (e) estimados en esta Tesis para cada sistema de CGs, incluyendo los valores medidos para la luz de la galaxia obtenidos de NED (subíndice G). Los valores con el superíndice (L) se obtuvieron de la base de datos HyperLEDA (<http://leda.univ-lyon1.fr/>).

oportunidad, anillos elípticos (Figura 9.11 y Tabla 9.1) con valores de e y AP obtenidos del análisis acimutal. En el caso de NGC 3414 se consideraron anillos circulares para la construcción del perfil, debido a la baja elipticidad que presenta su sistema de CGs. En la Fig. 9.11 se muestra el ajuste realizado sobre los perfiles, considerando una ley de potencia y una ley de de Vaucouleurs. En dicha figura las líneas punteadas verticales y horizontal indican el rango donde se realizaron los ajustes y el nivel de contaminación considerado, respectivamente. Además, a modo complementario, con línea continua gris se superpone el perfil de brillo de la galaxia.

De la misma manera, en la Figura 9.12 se muestran los perfiles de densidad para cada

subpoblación de CGs presentes en cada galaxia. En las diferentes subpoblaciones de NGC 3414, y en la subpoblación azul de NGC 4546 y NGC 6861, se consideraron anillos circulares para construir los perfiles de densidad. Al igual que lo realizado anteriormente para la muestra total de candidatos a CGs, se muestran en dicha figura los ajustes considerando una ley de potencia y una ley de de Vaucouleurs. En la Tabla 9.3 se listan los valores obtenidos en dichos ajustes para cada subpoblación de CGs.

Galaxia	Subpoblac.	AP (grados)	e	Ley Pot.	Ley de Vauc.
NGC 2549	Azul	182.4 ± 8.0	0.65 ± 0.07	-2.19 ± 0.21	-1.23 ± 0.10
	Roja	177.3 ± 2.2	0.84 ± 0.03	-2.19 ± 0.17	-1.32 ± 0.09
NGC 2880	Azul	156 ± 18.8	0.56 ± 0.18	-1.46 ± 0.07	-0.77 ± 0.05
	Roja	115 ± 17.9	0.64 ± 0.18	-1.51 ± 0.11	-0.81 ± 0.07
NGC 2612	—	—	—	—	—
NGC 4546	Azul	85.2 ± 28.1	0.41 ± 0.20	-1.40 ± 0.13	-0.75 ± 0.08
	Intermedia	95.5 ± 6.2	0.71 ± 0.07	-2.65 ± 0.16	-1.53 ± 0.09
	Roja	69.4 ± 3.7	0.72 ± 0.04	-3.98 ± 0.28	-1.97 ± 0.17
NGC 3414	Azul	6.58 ± 23.3	0.37 ± 0.13	-0.93 ± 0.18	-0.59 ± 0.10
	Intermedia	23.8 ± 13.4	0.46 ± 0.09	-1.73 ± 0.19	-1.08 ± 0.12
	Roja	47.1 ± 41.7	0.31 ± 0.19	-3.65 ± 0.25	-2.12 ± 0.15
	+Roja	114 ± 80.4	0.25 ± 0.31	-2.92 ± 0.23	-1.91 ± 0.17
NGC 5838	Azul	47.2 ± 5.8	0.74 ± 0.05	-2.35 ± 0.28	-1.21 ± 0.14
	Roja	40.2 ± 2.5	0.80 ± 0.03	-1.91 ± 0.15	-1.14 ± 0.09
	+Roja	32.2 ± 3.7	0.82 ± 0.03	-2.39 ± 0.27	-1.36 ± 0.15
NGC 6861	Azul	—	—	-1.47 ± 0.07	-0.73 ± 0.04
	Intermedia	145 ± 13	0.54 ± 0.10	-1.45 ± 0.08	-0.75 ± 0.05
	Roja	146.8 ± 5	0.64 ± 0.04	-1.94 ± 0.09	-1.04 ± 0.06

TABLA 9.3: Valores de las pendientes obtenidas para cada subpoblación de CGs, mediante el ajuste de una ley de potencia y una ley de de Vaucouleurs sobre los perfiles de densidad. En el caso de las subpoblaciones de NGC 3414 y la subpoblación azul de NGC 4546 y NGC 6861 se consideraron anillos circulares.

Al comparar estos valores en las diferentes galaxias, se observan algunas características muy notables. En particular, se destaca la similitud obtenida entre las pendientes de las subpoblaciones azul y roja en NGC 2549 y en NGC 2880, dado que en general es esperable encontrar una distribución espacial más extendida en los cúmulos azules en comparación con los rojos. Si bien ambos casos resultan similares, las subpoblaciones de CGs presentes en NGC 2549 se muestran más concentradas en comparación a las de NGC 2880, en particular sus candidatos a CGs azules. Si se acepta que parte de la subpoblación de cúmulos del halo de las galaxias tiene su origen en la acreción de pequeños satélites (Côté et al., 1998) de bajo contenido metálico, proceso que “expande” dicha componente haciéndola más extendida, entonces una posible explicación para la alta concentración espacial exhibida por los CGs azules en NGC 2549 es que tal proceso no haya sido eficiente en esta galaxia. Otra opción con respecto a esta particular característica mostrada por los candidatos azules, se podría explicar también en el caso de una formación de CGs más intensa en comparación a lo observado en otras galaxias. Si dicho proceso resultó en una fase disipativa violenta, entonces se esperaría observar un gradiente en el color de esta subpoblación. Otra de las galaxias que muestra una

situación similar es NGC 5838, aunque en este caso la subpoblación roja presenta una pendiente marginalmente menor dentro de los errores.

Por otro lado, las subpoblaciones rojas de NGC 4546 y NGC 3414 muestran un mayor grado de concentración hacia las mismas, al compararlas con el resto de las galaxias. La formación y posterior evolución *in situ* de CGs en regiones cercanas a los núcleos de las mencionadas galaxias, producto de una significativa cantidad de gas, podría explicar la notable concentración espacial mostrada por estas subpoblaciones. Si este fuera el caso, al igual que lo mencionado anteriormente para los candidatos azules de NGC 2549, se esperaría ver un gradiente de color en estas subpoblaciones de CGs rojos. La presencia de gradientes en el color de las diferentes subpoblaciones de CGs se muestra en el siguiente capítulo.

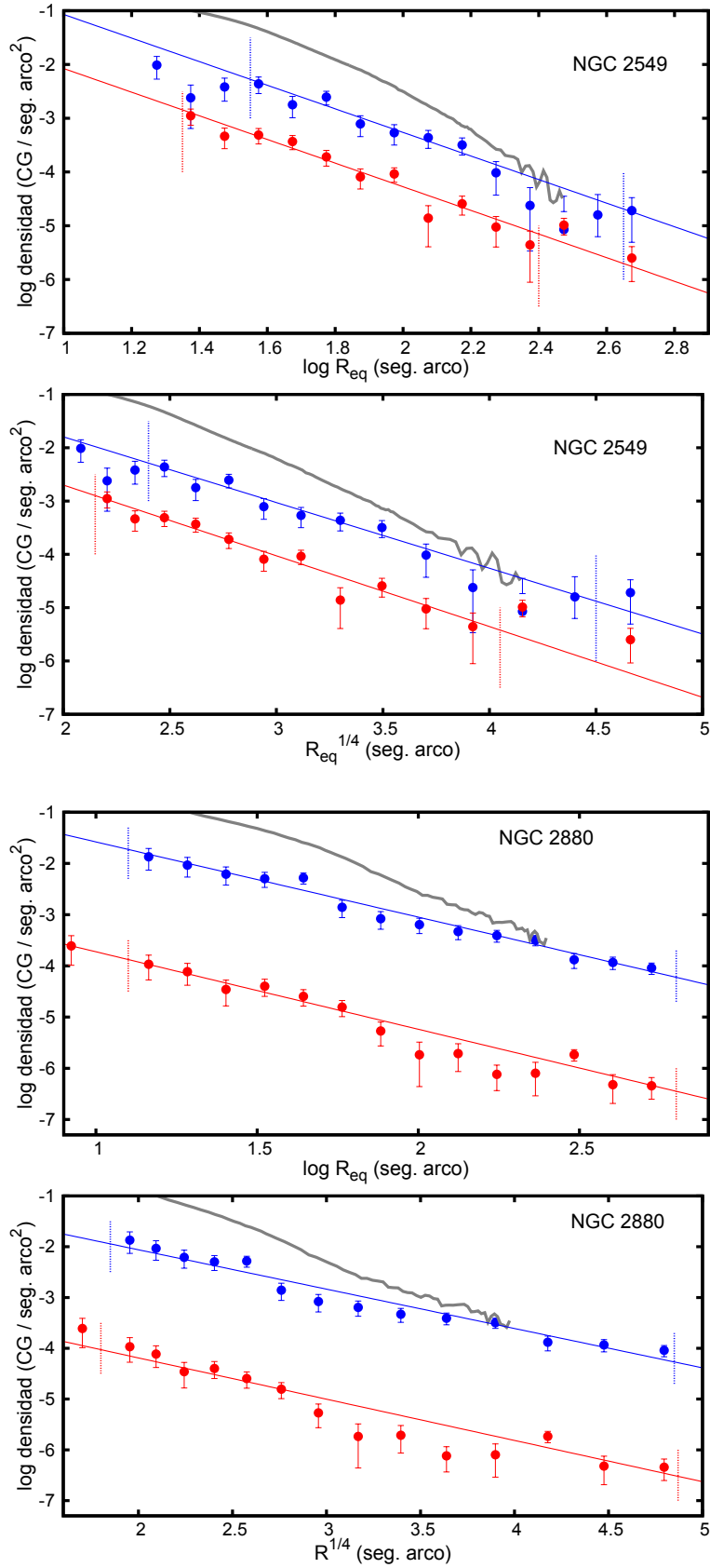


FIGURA 9.12: Perfiles de densidad corregidos por contaminación y completitud areal para cada subpoblación de CGs. Los mismos fueron desplazados en el eje de las ordenadas para evitar la superposición. En cada caso se ajustaron una ley de potencia y una ley de de Vaucouleurs. Los puntos azules, verdes, rojos y magenta indican las subpoblaciones de CGs azul, intermedia, roja y con colores más rojos, respectivamente. La línea continua gris muestra el perfil de brillo de la galaxia anfitriona y las líneas punteadas verticales los rangos utilizados para los ajustes.

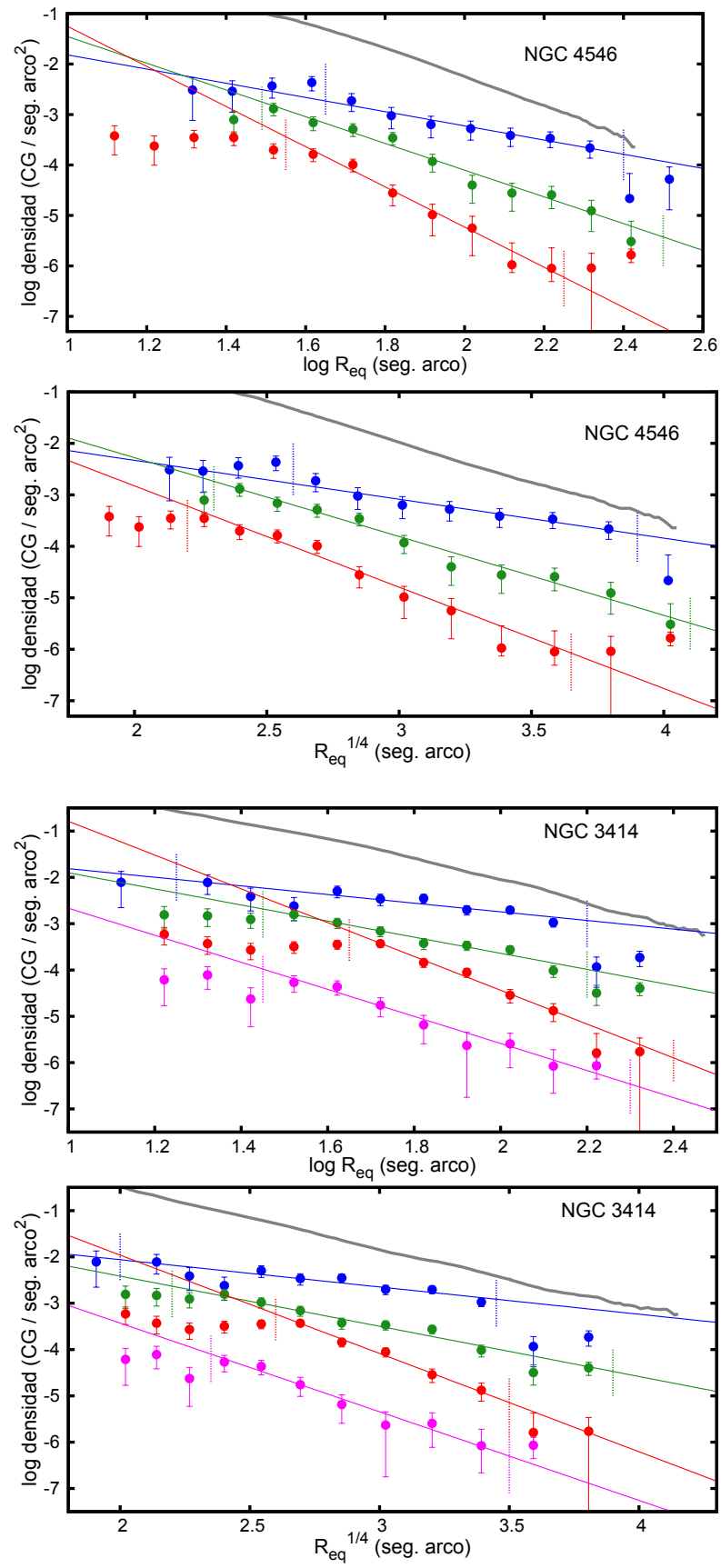


FIGURA 9.12: Continuación

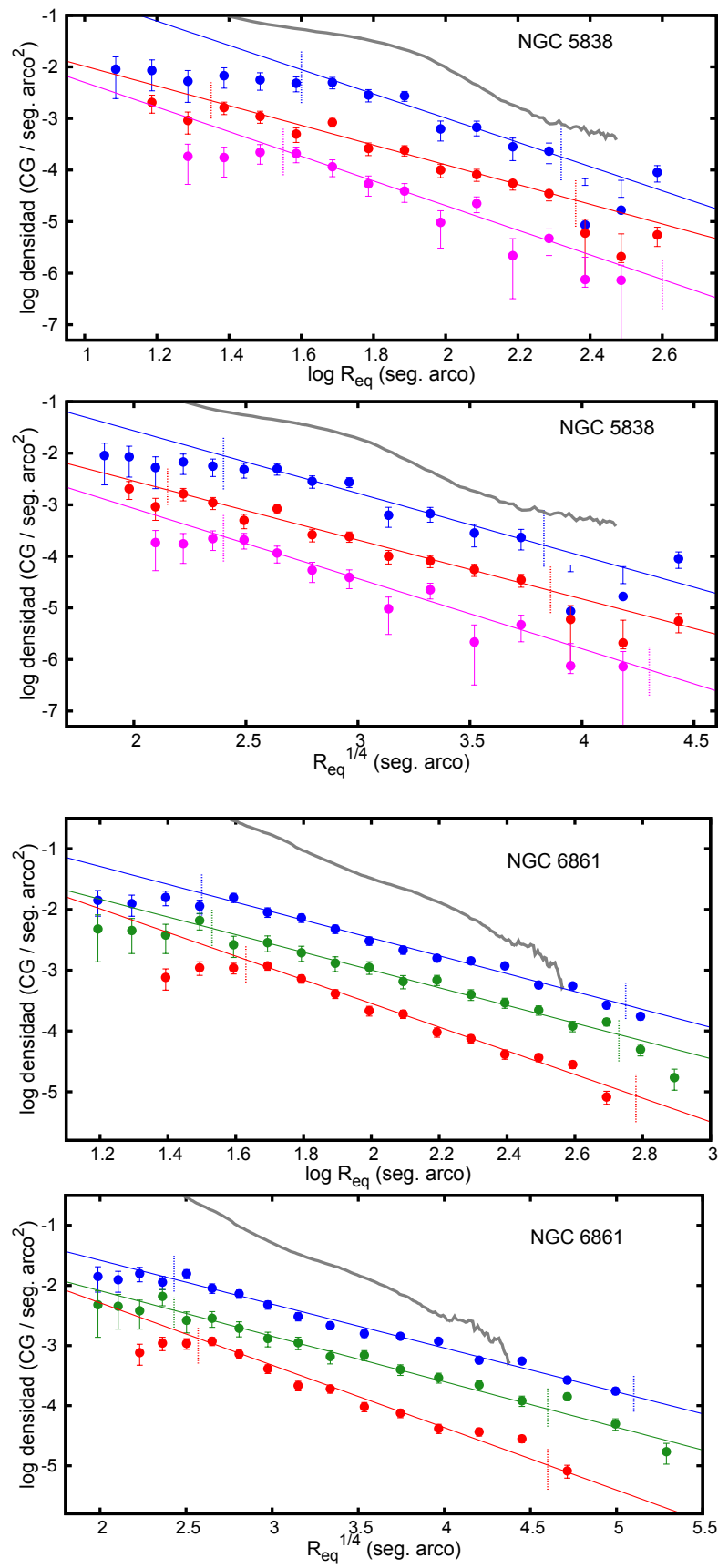


FIGURA 9.12: Continuación

Capítulo 10

Tendencias radiales

10.1 Comparación con el halo de las galaxias

Para estudiar la distribución de metalicidades en galaxias distantes se requieren observaciones de la luz integrada de las mismas. Sin embargo, los perfiles de brillo superficial de las galaxias de tipo temprano caen rápidamente con el radio galactocéntrico, por lo que es difícil de examinarlas más allá de unos pocos radios efectivos. En este sentido, uno de los trazadores de las poblaciones estelares del halo, son los CGs. Las ventajas que presentan los mismos es que si bien algunos se destruyen con el tiempo, estos contribuyen directamente a la población de campo del halo. Por otro lado, cuando una galaxia de baja masa es acretada por una más grande, los CGs pueden sobrevivir durante el proceso de interacción (Forbes & Bridges, 2010), conservando información acerca de su galaxia huésped original. Además, los sistemas de CGs pueden extenderse más allá de 100 kpc y por lo tanto permiten investigar los halos galácticos a distancias de varios radios efectivos.

Como ya se mencionó, los sistemas de CGs de diversas galaxias consisten generalmente de dos subpoblaciones típicas, la azul (o pobre en metales) y la subpoblación roja (o rica en metales). En diferentes galaxias de tipo temprano, se encontró que el color medio de los CGs rojos es similar al color interno del bulbo de sus galaxias anfitrionas (Forbes & Forte, 2001). Esto es consecuencia de un fuerte vínculo genético entre las estrellas de campo del bulbo/esferoide y los CGs rojos. Por su parte, los CGs azules se encontrarían vinculados al halo de baja metalicidad presente en las galaxias (Forte et al., 2009). El color medio de ambas subpoblaciones se correlaciona con la luminosidad o la masa de la galaxia anfitriona (Forbes et al. 1997; Larsen et al. 2001; Strader et al. 2004; Peng et al. 2006). Comúnmente en estos tipos de estudios, el color medio utilizado se deriva de las regiones centrales de la galaxia. Diversos estudios de los sistemas de CGs extragalácticos han revelado dos tendencias adicionales: por un lado, el color medio de los CGs de una

dada subpoblación puede variar suavemente con el radio galactocéntrico, y por otro, el color (metalicidad) de los mismos puede mostrar una correlación con la magnitud integrada (masa de la galaxia).

La primera de estas tendencias, surge de diferentes estudios que reportan un gradiente de metalicidad negativo para ambas subpoblaciones azul y roja en galaxias elípticas (Harris 2009a,b; Faifer et al. 2011). Estos fuertes gradientes de metalicidad de las regiones interiores del halo, sugieren un proceso de formación disipativo para ambas subpoblaciones de CGs.

La segunda tendencia, es la llamada *blue-tilt* (los CGs azules tienen colores más rojos hacia magnitudes más brillantes), la cual ha sido reportada en una variedad de galaxias incluyendo diversas elípticas masivas (Harris et al. 2006; Forte et al. 2007; Wehner et al. 2008; Harris 2009a), elípticas de menor masa (Strader et al., 2006), enanas de tipo temprano (Mieske et al., 2006b), espirales de tipo temprano (Spitler et al., 2006) y espiral tipo Vía Láctea (Forbes & Bridges, 2010).

En este contexto, a partir de la obtención de los perfiles de brillo en los filtros g' e i' , vistos en el Capítulo 6, se construyeron perfiles radiales de colores integrados para el halo de las galaxias de la muestra. Dado que las galaxias llenan toda el área de una imagen GMOS, la estimación de un nivel de cielo verdadero que permita obtener un perfil de color seguro hasta los bordes del campo es prácticamente imposible. Es por ello que los perfiles de color obtenidos serán representativos de la región más interna de las galaxias, donde el mencionado nivel de cielo tiene un impacto moderado.

A continuación se presenta una comparación de los colores de la zona interna de cada galaxia con un análisis de la tendencia radial de los colores medios de los CGs.

NGC 2549: el perfil de color de esta galaxia resulta confiable dentro de un radio menor a $2R_{\text{ef}}$, dado que a partir del mismo el error en el nivel de cielo comienza a tener un efecto considerable. En la Figura 10.1 se compara el color del halo de NGC 2549 con el color medio de los CGs. Los valores medios en color para las subpoblaciones azul y roja se obtuvieron considerando diferentes intervalos galactocéntricos con el mismo número de objetos, en este caso 55, y aplicando posteriormente el algoritmo GMM sobre cada intervalo para obtener la posición de los picos. En dicha figura, se aprecia que hacia la parte interna los candidatos rojos muestran un color similar al halo de la galaxia. Por su parte, los candidatos azules parecen mostrar un gradiente negativo hacia afuera. Para cuantificar el mismo, se aplicó la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$ (Harris, 2009b), con $R_{\text{ef}} = 19.05$ segundos de arco (ver Tabla 2.1), obteniendo $a = 0.738 \pm 0.003$ y $b = -0.143 \pm 0.005$, el cual resulta similar al obtenido en la galaxia NGC 5838. Sin embargo, este resultado debe ser considerado con cautela dado que el gradiente se ha medido con solo tres puntos.

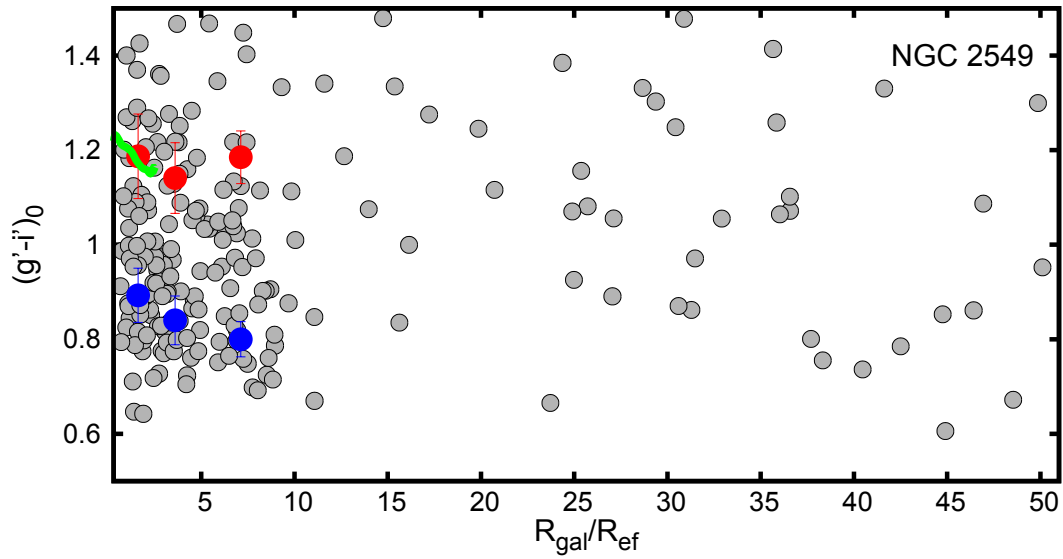


FIGURA 10.1: Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada normalizada por R_{ef} correspondiente a la muestra de candidatos a CGs (círculos llenos grises) de NGC 2549. El perfil de color del halo de la galaxia se muestra mediante línea continua. Los círculos llenos rojos y azules representan los valores medios en color de las subpoblaciones roja y azul, respectivamente.

NGC 2880: el bajo número de objetos presentes en la muestra de candidatos a CGs, dificulta la convergencia del algoritmo GMM en los diferentes rangos radiales. Por ello, para comparar el color del halo de la galaxia con el color medio de las subpoblaciones se utilizó un método alternativo, separando la muestra de candidatos azules y rojos según los rangos en color mencionado en el Capítulo 9 y obteniendo los colores medios en diferentes intervalos radiales. La cantidad de objetos por intervalo utilizados para la subpoblación azul y roja fueron de 30 y 25 candidatos, respectivamente. La Figura 10.2 muestra que el color de la galaxia en la región interna resulta similar al de la subpoblación roja. De igual manera a lo realizado en NGC 2549, se utilizó la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$, con $R_{\text{ef}} = 20.89$ segundos de arco para cuantificar posibles gradientes en las subpoblaciones. Solo en el caso de los candidatos azules se pudo estimar el mismo, resultando en $a = 0.805 \pm 0.006$ y $b = -0.027 \pm 0.008$.

NGC 2612: como se mostró en el Capítulo 8, el bajo número de candidatos a CGs que posee esta galaxia dificulta el análisis de su sistema de CGs. Por ello, para comparar el color del halo de NGC 2612 con el color medio de sus CGs, se estimó el color medio en intervalos radiales conteniendo cada uno aproximadamente 20 objetos. La Figura 10.3 muestra el buen acuerdo que se obtiene entre el color del halo de la galaxia y la muestra de CGs. En dicha figura parece observarse un leve gradiente negativo. Para cuantificar el mismo, se utilizó la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$, con $R_{\text{ef}} = 16.93$ segundos de arco, obteniendo $a = 0.948 \pm 0.011$ y $b = -0.099 \pm 0.011$.

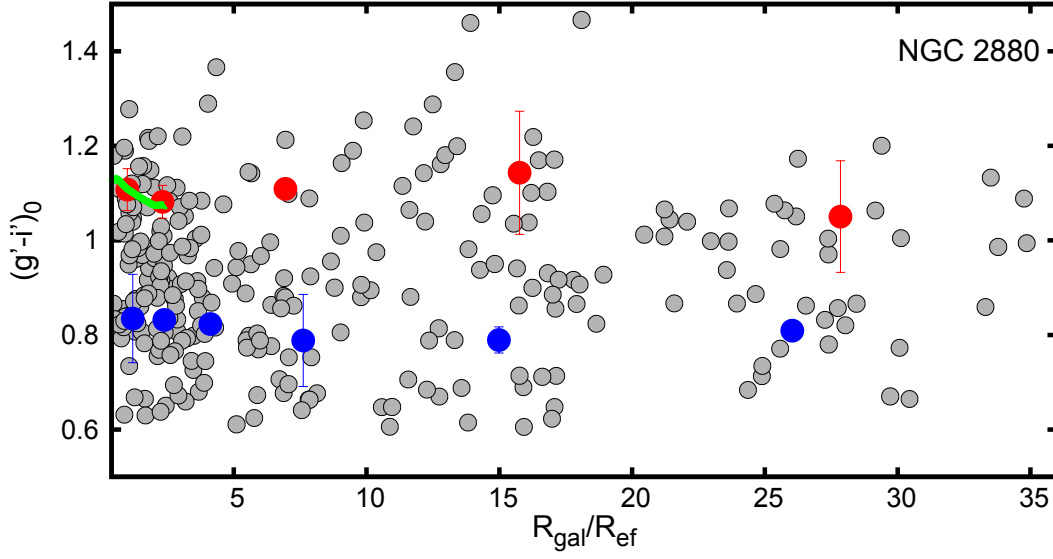


FIGURA 10.2: Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada normalizada por R_{ef} correspondiente a la muestra de candidatos a CGs (círculos llenos grises) de NGC 2880. El perfil de color del halo de la galaxia se muestra mediante línea continua. Los círculos llenos rojos y azules representan los valores medios en color de las subpoblaciones roja y azul, respectivamente.

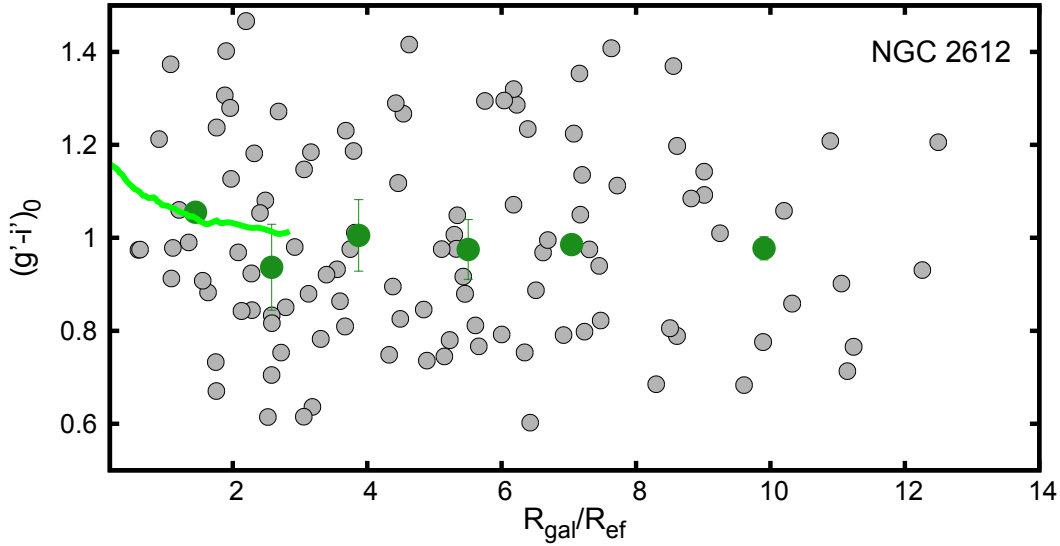


FIGURA 10.3: Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada normalizada por R_{ef} correspondiente a la muestra de candidatos a CGs (círculos llenos grises) de NGC 2612. El perfil de color del halo de la galaxia se muestra mediante línea continua. El color medio para la muestra total de candidatos a CGs se representan con círculos llenos verdes.

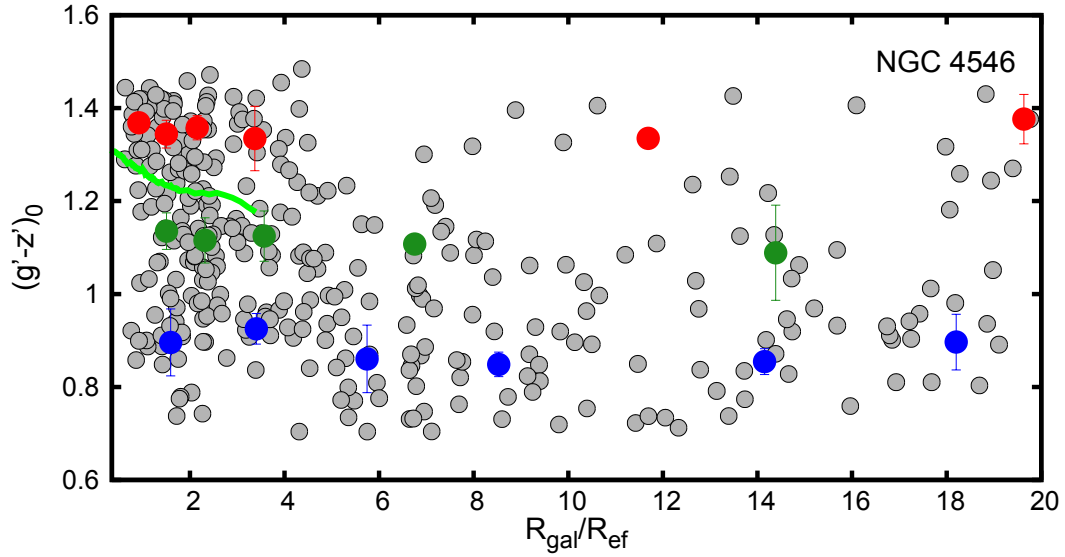


FIGURA 10.4: Color $(g' - z')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada normalizada por R_{ef} correspondiente a la muestra de candidatos a CGs (círculos llenos grises) de NGC 4546. El perfil de color del halo de la galaxia se muestra mediante línea continua. Los círculos llenos rojos, verdes y azules representan los valores medios en color de las subpoblaciones roja, intermedia y azul, respectivamente.

NGC 4546: al igual que en las galaxias anteriormente mencionadas, los perfiles de color $(g' - i')_0$ y $(g' - z')_0$ de NGC 4546 resultan confiables dentro de $3R_{\text{ef}}$. Dada la dificultad que presenta separar las subpoblaciones considerando la distribución de color $(g' - i')_0$, se optó por comparar el color de la galaxia en $(g' - z')_0$ con el color medio de las diferentes subpoblaciones. Esto último se realizó separando las subpoblaciones de CGs de acuerdo a los rangos en color considerados en el Capítulo 9, y luego obteniendo los colores medios en diferentes intervalos radiales conteniendo el mismo número de objetos (26, 22 y 18 candidatos para la subpoblación azul, intermedia y roja, respectivamente). En la Figura 10.4 se observa que el perfil de color $(g' - z')_0$ de NGC 4546 resulta más “azul” que la subpoblación roja, la cual presenta colores medios $(g' - z')_0 \sim 1.33$ mag. Por otro lado, las subpoblaciones azul e intermedia parecen mostrar un pequeño gradiente negativo en el color. Para cuantificar dicho gradiente se utilizó la expresión $(g' - z')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$, con $R_{\text{ef}} = 25.12$ segundos de arco. Los valores obtenidos para los parámetros a y b se listan en la Tabla 10.1. Estos gradientes presentes en las regiones internas de las subpoblaciones que luego se mantienen con un valor constante en el color, son indicativos de procesos de formación disipativos (Forbes & Forte 2001; Forbes et al. 2011). Esto es, las distintas subpoblaciones se habrían formado a partir de dichos procesos, en contraste con la formación en procesos denominados “secos”, donde no sería de esperar la presencia de gradientes.

Subpoblación	a	b
Azul	0.826 ± 0.021	-0.092 ± 0.038
Intermedia	1.087 ± 0.006	-0.038 ± 0.008
Roja	1.325 ± 0.008	-0.028 ± 0.007

TABLA 10.1: Gradientes de color obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 4546, empleando la expresión $(g' - z')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$, con $R_{\text{ef}} = 25.12$ segundos de arco.

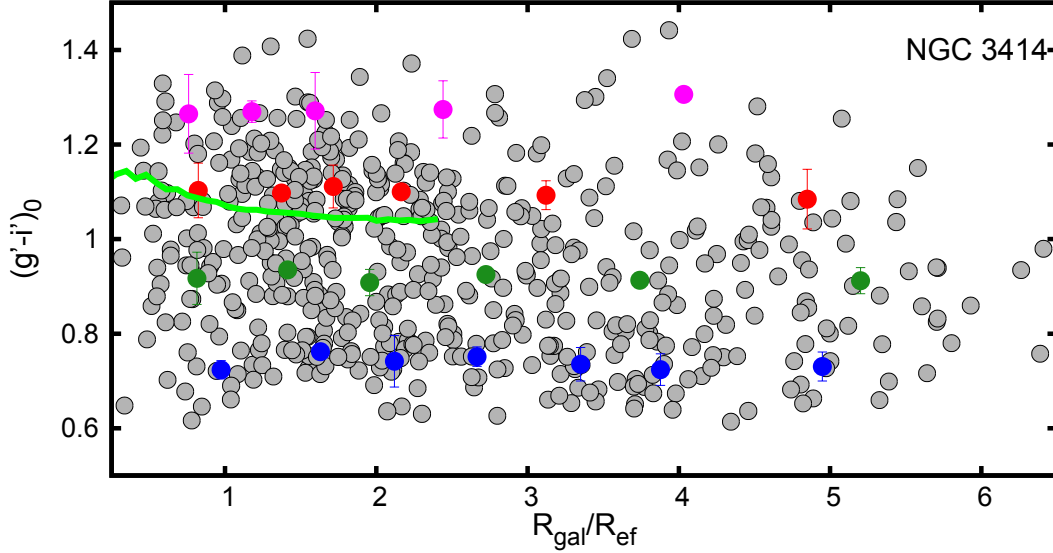


FIGURA 10.5: Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada normalizada por R_{ef} correspondiente a la muestra de candidatos a CGs (círculos llenos grises) de NGC 3414. El perfil de color del halo de la galaxia se muestra mediante línea continua. Los círculos llenos magenta, rojos, verdes y azules representan los valores medios en color de los candidatos a CGs con colores más rojos, y las subpoblaciones roja, intermedia y azul, respectivamente.

NGC 3414: esta galaxia llena completamente el campo de GMOS, por ello no es posible obtener una adecuada estimación del nivel de cielo necesaria para la construcción del perfil de color. Para obtener un perfil representativo del color del halo, el mismo se consideró hasta un radio de $2.3R_{\text{ef}}$, donde el efecto del error en el nivel de cielo resulta despreciable. Los valores medios en el color en función del radio galactocéntrico para los candidatos a CGs azules, intermedios, rojos y con colores más rojos (ver Capítulo 9), se efectuó de igual manera que en el caso de NGC 2880. La cantidad de objetos por intervalo para las subpoblaciones antes mencionadas fueron de 22, 30, 32 y 10, respectivamente. Como se observa en la Figura 10.5, el color de la galaxia resulta un poco azul con respecto a la subpoblación roja de NGC 3414 para $R_{\text{gal}} > 1R_{\text{ef}}$. En dicha figura se observa que los candidatos azules e intermedios parecen exhibir un gradiente en el color. Al igual que en las galaxias antes mencionadas, se ajustó la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$ ($R_{\text{ef}} = 23.98$ segundos de arco y evitando el punto más interno) sobre los candidatos azules, intermedios y rojos. La Tabla 10.2 lista los valores obtenidos en cada caso.

Subpoblación	a	b
Azul	0.667 ± 0.013	-0.074 ± 0.011
Intermedia	0.883 ± 0.022	-0.039 ± 0.021
Roja	1.093 ± 0.019	-0.004 ± 0.016

TABLA 10.2: Gradientes de color obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 3414, utilizando la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$, con $R_{\text{ef}} = 23.98$ segundos de arco.

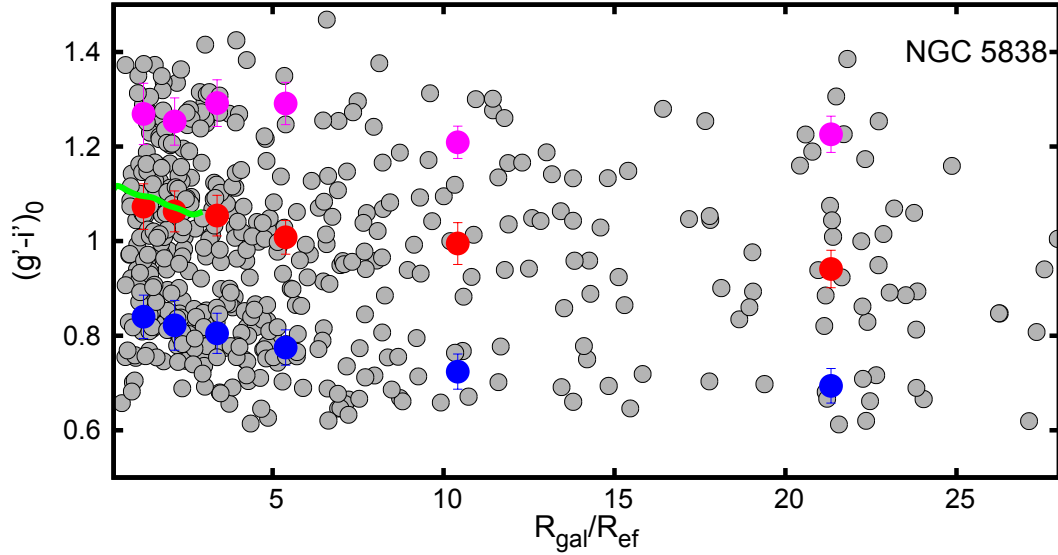


FIGURA 10.6: Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada normalizada por R_{ef} correspondiente a la muestra de candidatos a CGs (círculos llenos grises) de NGC 5838. El perfil de color del halo de la galaxia se muestra mediante línea continua. Los círculos llenos magenta, rojos y azules representan los valores medios en color de los candidatos a CGs con colores más rojos, y las subpoblaciones roja y azul, respectivamente.

NGC 5838: la comparación entre el color de la galaxia y el color presentado por las diferentes subpoblaciones, se realizó aplicando el algoritmo GMM en modo homocedástico (iguales dispersiones) sobre diferentes intervalos radiales, para facilitar su convergencia. El número de candidatos por intervalo fue aproximadamente de 88 objetos. En la Figura 10.6 se observa que el color medio de los CGs rojos resulta similar al color de la galaxia. Por otro lado, también se aprecian fuertes gradientes negativos ($R_{\text{gal}} < 7R_{\text{ef}}$), principalmente en las subpoblaciones azul y roja, manteniéndose luego constante el color hacia radios mayores. Para cuantificar dichos gradientes, se utilizó nuevamente la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$ sobre las tres subpoblaciones. Los valores obtenidos se listan en la Tabla 10.3. Otra galaxia S0 que presenta fuertes gradientes es su sistema de CGs es NGC 1407, estudiada en detalle por Forbes et al. (2011). Sin embargo, los valores obtenidos en esta Tesis para NGC 5838 resultan mayores en un factor ~ 2 con respecto a dicha galaxia.

Subpoblación	a	b
Azul	0.687 ± 0.006	-0.126 ± 0.008
Roja	0.943 ± 0.010	-0.111 ± 0.013
+Roja	1.216 ± 0.022	-0.055 ± 0.032

TABLA 10.3: Gradientes de color obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 5838, mediante el empleo de la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$, con $R_{\text{ef}} = 25.12$ segundos de arco.

NGC 6861: el perfil de esta galaxia fue calculado dentro de un radio menor a 2 minutos de arco, a fin de evitar el fuerte efecto del error en el nivel de cielo. En el panel superior de la Figura 10.7, se compara el color del halo de la galaxia con el color medio de los CGs para el caso bimodal. Para separar las subpoblaciones azul y roja, se consideró el corte en color en $(g' - i')_0 = 0.90$ mag. Puede observarse que los CGs rojos presentan un comportamiento similar al de la región interna del halo, aunque ligeramente más azules. Sin embargo, considerando el caso trimodal ($(g' - i')_0 \leq 0.88$, $0.88 < (g' - i')_0 < 1.01$ y $(g' - i')_0 \geq 1.01$ mag, para las subpoblaciones azul, intermedia y roja, respectivamente), podemos ver que los CGs rojos lucen casi idénticos en color con respecto al halo (panel inferior en Fig. 10.7). En ambos casos, las subpoblaciones de CGs fueron separadas empleando los valores obtenidos en base a los resultados de GMM, y luego se obtuvieron los colores medios dentro de diferentes intervalos galactocéntricos conteniendo el mismo número de objetos (85 CGs en el caso bimodal y 51 en el caso trimodal). Es interesante ver que la fig. 16 de Blom et al. (2012) presenta resultados similares para el sistema de CGs de la galaxia E gigante NGC 4365.

La subpoblación azul de NGC 6861 parece mostrar un leve gradiente en su región más interna. Por ello, al igual que lo realizado sobre las demás galaxias, se utilizó la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$ considerando el caso trimodal, para cuantificar los mismos sobre las diferentes subpoblaciones de CGs. La Tabla 10.4 lista los valores obtenidos para los parámetros ajustados.

Subpoblación	a	b
Azul	0.768 ± 0.001	-0.019 ± 0.003
Intermedia	0.944 ± 0.002	-0.005 ± 0.004
Roja	1.122 ± 0.003	-0.029 ± 0.007

TABLA 10.4: Gradientes de color obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 6861 (caso trimodal). Los mismos se realizaron mediante el ajuste de la expresión $(g' - i')_0 = a + b \log(R/R_{\text{ef}})$, con $R_{\text{ef}} = 17.70$ segundos de arco.

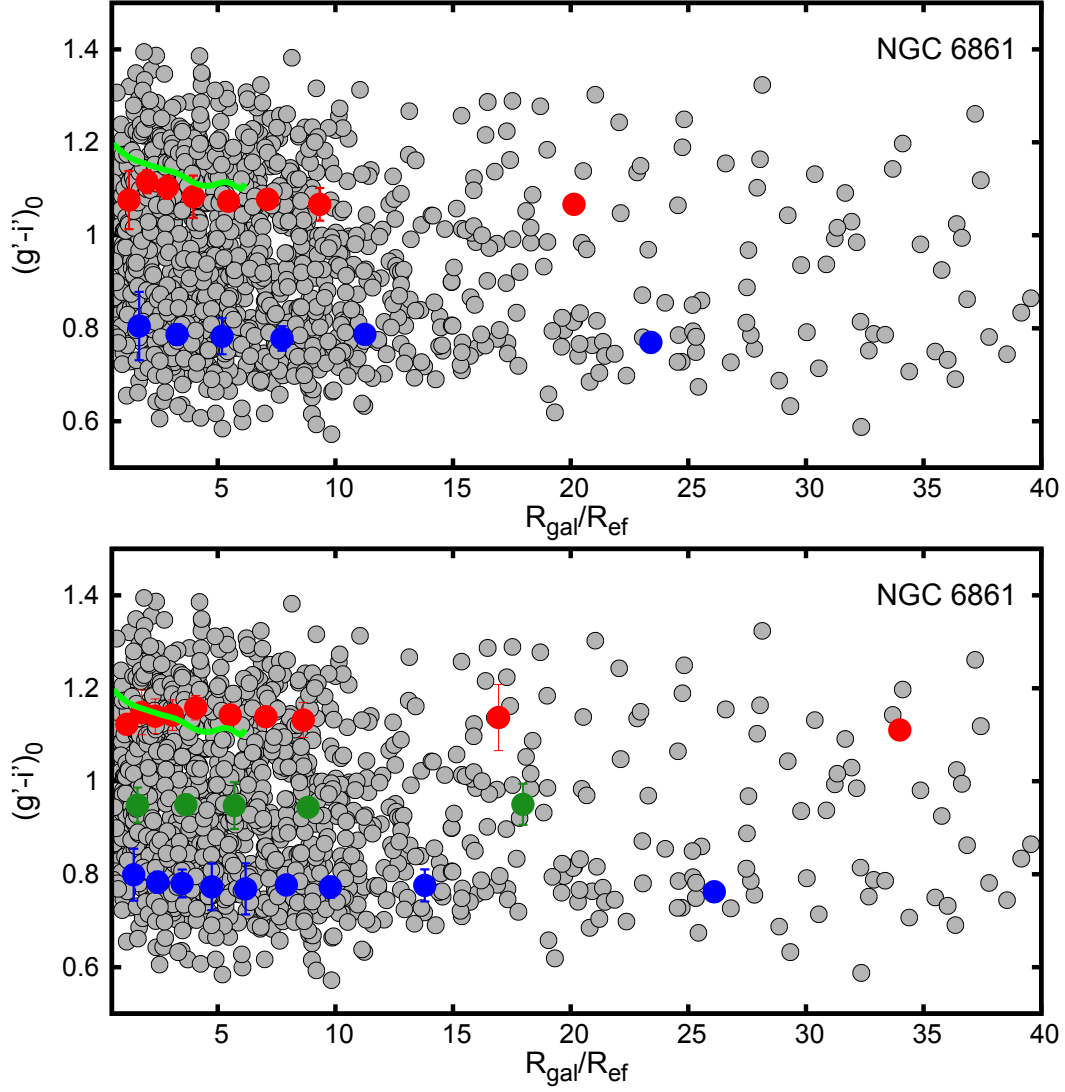


FIGURA 10.7: Color $(g' - i')_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada normalizada por R_{ref} correspondiente a la muestra de candidatos a CGs (círculos llenos grises) de NGC 6861. El perfil de color del halo de la galaxia se muestra mediante línea continua. Panel superior: color medio en función del radio galactocéntrico considerando dos subpoblaciones de CGs (azul y roja). Panel inferior: color medio en función del radio galactocéntrico para el caso trimodal. Los círculos llenos rojos, verdes y azules representan los valores medios en color de las subpoblaciones roja, intermedia y azul, respectivamente.

Capítulo 11

Función de luminosidad

11.1 Funciones de luminosidad globales

El número de objetos en función de su magnitud, denominada función de luminosidad, es una de las características más importantes que poseen los sistemas de CGs. La función de luminosidad de CGs (FLCG) es utilizada como método de determinación de distancia (Secker 1992; Sandage & Tammann 1995), como también para estimar la población total de CGs en galaxias. Esto último se realiza en conjunto con la integración del perfil de densidad. La exactitud obtenida en los valores de distancias empleando la FLCG oscila entre 0.1 a 0.2 mag, siendo comparable incluso con otros métodos utilizados sobre galaxias de tipo temprano (Harris 1991; Jacoby et al. 1992; Ashman et al. 1995; Whitmore 1997; Harris 2001; Kissler-Patig 2000).

Para construir la FLCG es necesario medir, en un determinado filtro, la magnitud aparente de un número considerable de candidatos a CGs en un sistema. La característica principal que se observa en la FLCG es la presencia de un pico en la distribución de brillos aparentes, denominado *turn-over* (TO). Es por ello, que al realizar estimaciones de distancias mediante este método, es necesario alcanzar magnitudes más débiles que este valor para obtener un ajuste aceptable del mismo, para luego poder compararla con el valor de la FLCG de la Vía Láctea. Esta última se encuentra calibrada en base a distancias individuales precisas a CGs, con el valor de TO en torno a $M_V \sim -7.5$ mag (por ejemplo Harris 2001).

La forma comúnmente adoptada para obtener el valor del TO en la FLCG, es mediante el ajuste de una función gaussiana:

$$\frac{dN}{dm} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(m - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (11.1)$$

la cual posee solo dos parámetros: la dispersión (σ) y el pico o TO (μ). Es necesario aclarar que la utilización de este tipo de función brinda una parametrización de la FLCG, sin motivación física alguna (Harris, 2001), sin embargo la misma resulta aceptable. Una expresión alternativa para realizar el ajuste de la FLCG, es utilizar la función $t5$ (Secker, 1992), debido a la asimetría que suele presentar la FLCG mostrando una cola más larga hacia el extremo brillante. Sin embargo, dado que es más común encontrar resultados en base a ajustes gaussianos en la literatura, se decidió utilizar ese mismo tipo de función en esta Tesis.

En este contexto, se determinaron las FLCGs para las diferentes galaxias de la muestra. Para ello, se consideraron diferentes aspectos a la hora de construir las mismas, siguiendo en todas ellas los siguientes lineamientos. En primer lugar, a partir de los catálogos fotométricos correspondientes a cada galaxia, los cuales contenían todos los objetos detectados en los campos de estudio, se seleccionaron los objetos puntuales (índice de estelaridad >0.5) y se realizaron los mismos cortes en los colores mencionados en la Sección 7.1, pero sin acotar el rango de magnitudes correspondiente al filtro de referencia (Tabla 5.4) utilizado en cada galaxia. Luego, se realizaron conteos de los candidatos considerando intervalos entre $0.25 - 0.35$ mag de acuerdo al número de objetos presentes en los catálogos resultantes mencionados anteriormente. La distribución de luminosidad cruda (sin corrección por contaminación ni completitud) para cada campo estudiado en los diferentes sistemas de CGs, y la correspondiente a cada región utilizada para corregir la contaminación, se muestran en la Figura 11.1 mediante histogramas con líneas continuas y punteadas, respectivamente. Posteriormente, cada campo se corrigió por efecto de completitud empleando las funciones de Pritchett obtenidas para cada galaxia (Sección 5.4), y también por contaminación, dado que la función de luminosidad de galaxias de fondo no resueltas tiende a imitar una magnitud TO más débil. En la Figura 11.1 se observa que para algunas galaxias, como por ejemplo NGC 4546, NGC 3414 y NGC 6861, parece ya claro que hemos alcanzado el TO, mientras que en NGC 2549, NGC 2612, NGC 2880 y NGC 5838, el mismo no resulta tan claro.

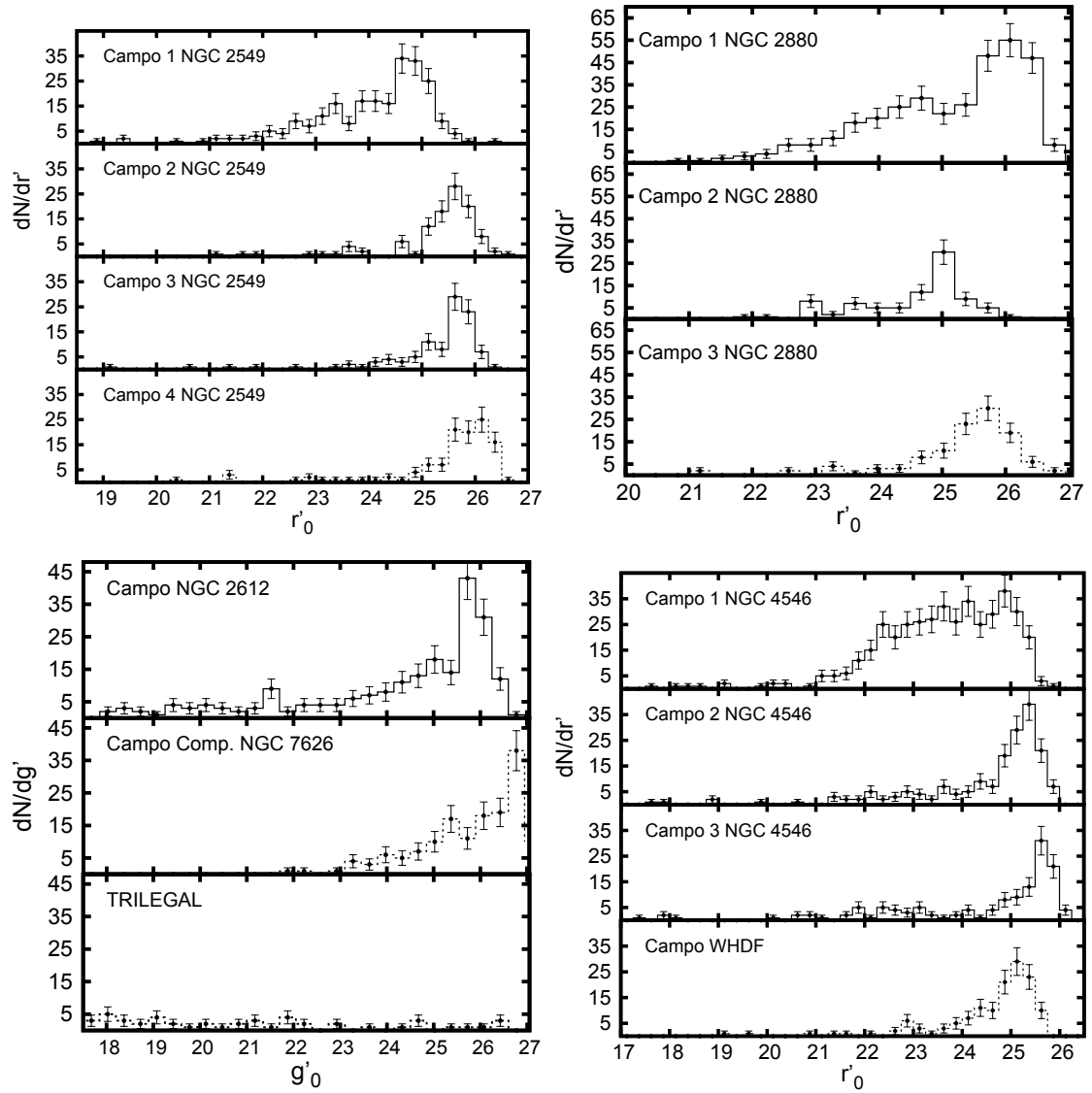


FIGURA 11.1: Histogramas crudos de la distribución de luminosidad para los diferentes sistemas de CGs (línea continua) y de las regiones consideradas de contaminación (línea punteada). Las barras de error representan el error poissoniano para los datos de ciencia.

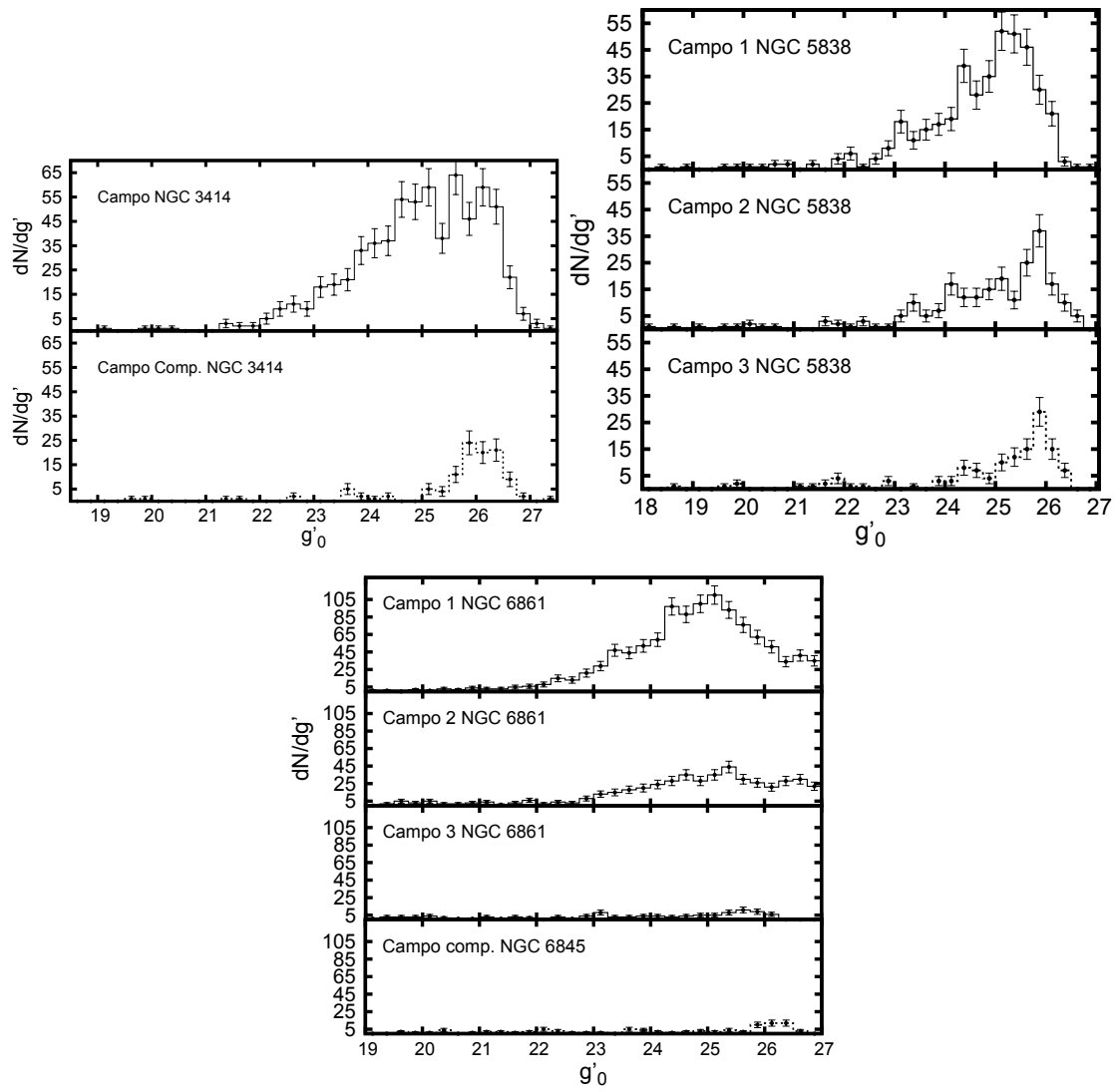


FIGURA 11.1: Continuación

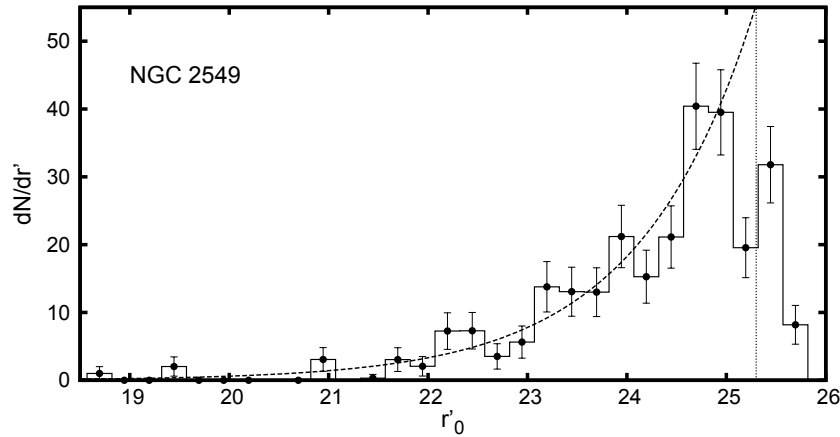


FIGURA 11.2: FLCG corregida de NGC 2549. La línea de trazos representa el ajuste obtenido mediante una ley de potencia. La línea punteada vertical indica la magnitud límite utilizada para el ajuste.

A continuación se verá el análisis realizado sobre las diferentes FLCGs de cada galaxia.

NGC 2549: como se observa en los histogramas crudos de la Figura 11.1, así como también en la Figura 9.1, los campos 1 y 2 de esta galaxia parecen contener la mayor cantidad de CGs. Es por ello que, acorde a lo mencionado en la Sección 7.2, se escogió el campo 4 (más alejado de la galaxia) para estimar la contaminación en los dos campos mencionados. De acuerdo al módulo de distancia adoptado que figura en la Tabla 2.1 ($(m - M) = 30.50$ mag), considerando el valor aproximado de TO de $M_R = -7.9$ mag (Richtler 2003; Rejkuba 2012) y la expresión de Lupton (2005) $R = r' - 0.2936(r' - i') - 0.1439$ (la cual relaciona los sistemas fotométricos $UBVR_cI_c$ y $u'g'r'i'z'$), el valor esperado de TO para NGC 2549 se encontraría en $r'_0 \sim 22.8$ mag. Sin embargo, al observar la FLCG corregida (Figura 11.2), el conteo de objetos continúa aumentando luego de dicho valor, mostrando un comportamiento exponencial. Los cúmulos estelares y/o CGs jóvenes originados por eventos de interacción y/o fusión en galaxias, presentan un comportamiento similar en su función de luminosidad (Meurer et al. 1995; Whitmore et al. 1999; Goudfrooij et al. 2004, 2007) al mostrado por NGC 2549. Otra interpretación de este comportamiento es que NGC 2549 podría encontrarse a una distancia mayor que la adoptada aquí en base a datos de la literatura, con lo cual todavía no se estaría alcanzando el pico en la FLCG con la muestra de candidatos a CGs.

De acuerdo a la separación en el color $(g' - i')_0$ para cada subpoblación (Capítulo 9), se obtuvo la FLCG corregida de cada una de ellas (Figura 11.3). En dicha figura se observa que la subpoblación roja muestra un pico en $r'_0 \sim 24.7$ mag, sin embargo debido a la cercanía que presenta con respecto al valor correspondiente al 80% de completitud ($r'_0 = 24.8$ mag), no puede afirmarse que el mismo sea el TO para la mencionada subpoblación. Por su parte, dado que en los candidatos azules parece observarse un pico en $r'_0 \sim 23.8$ mag, se ajustó una función gaussiana en el intervalo $21.8 < r'_0 < 24.55$ mag (panel superior en Fig. 11.3), permitiendo la libre variación de los parámetros

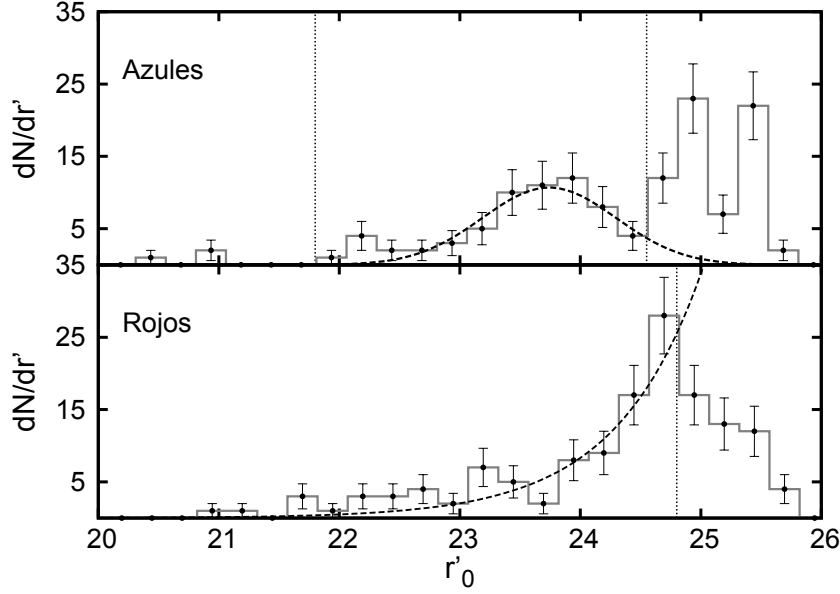


FIGURA 11.3: FLCG corregida obtenida para las subpoblaciones azul y roja de NGC 2549. La línea de trazos en el histograma correspondiente a la subpoblación roja, indica el ajuste obtenido mediante una ley de potencia. Las líneas punteadas verticales indican los rangos en magnitud considerados para los ajustes.

μ_r y σ_r . Los valores obtenidos fueron $\mu_r = 23.74 \pm 0.08$ y $\sigma_r = 0.55 \pm 0.08$ mag. Si bien este valor de dispersión resulta menor en comparación a los valores obtenidos en este tipo de análisis ($\sigma \sim 1.1$ mag), el mismo posiblemente se debe al bajo conteo de objetos presentes en las alas de la gaussiana. Transformando $M_R = -7.9$ mag mediante la expresión de Lupton (2005) obtenemos $M_r = -7.65$ mag. Utilizando este valor junto al valor obtenido para la subpoblación azul de $TO_{\text{azul}} = 23.74$, se obtiene un módulo de distancia de $(m - M) = 31.39$ mag. El bajo conteo y la forma que presenta la FLCG de NGC 2549, suscita que la estimación de distancia a esta galaxia mediante el método de la FLCG no sea concluyente.

Como se mencionó anteriormente, tanto la FLCG de la muestra total de CGs y de la subpoblación roja, muestran un comportamiento exponencial, similar al caso de NGC 1316 (Goudfrooij et al., 2004) y NGC 3610 (Goudfrooij et al., 2007), las cuales presentan múltiples subpoblaciones de CGs con diferentes características en términos de edad y metalicidad. Al igual que en estos últimos trabajos mencionados, se ajustó aquí una ley de potencia de la forma $\phi(L) \propto L^\alpha dL$ para la muestra total de CGs y para la subpoblación roja. Las Figuras 11.2 y 11.3 (panel inferior) muestran los resultados obtenidos. Los valores en dicho ajuste resultaron en $\alpha = -1.52 \pm 0.33$ y $\alpha = -0.92 \pm 0.09$, para la subpoblación roja y la muestra total de CGs, respectivamente. Si bien estos valores resultan menores (en valor absoluto) que los encontrados en galaxias con fusiones recientes ($\alpha \sim -2$), los mismos se asemejan a los casos mencionados anteriormente de NGC 1316 y NGC 3610.

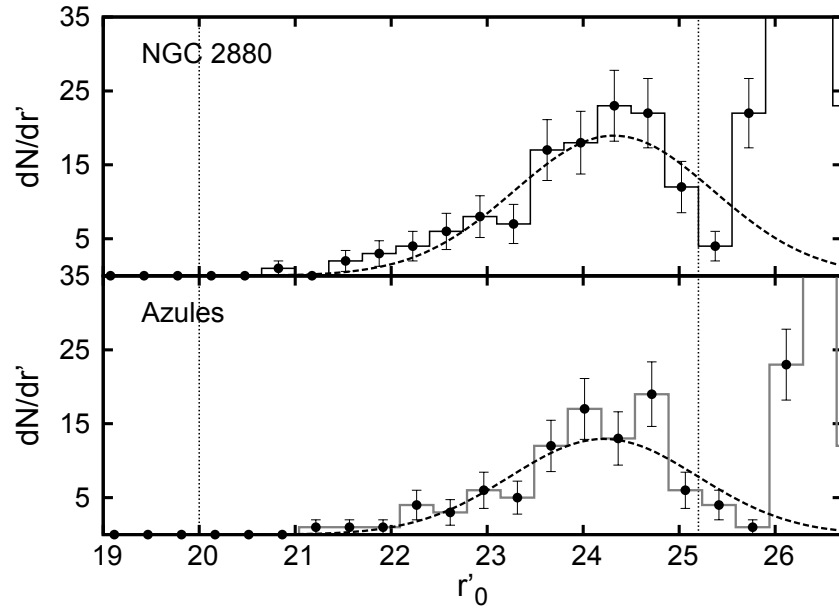


FIGURA 11.4: Panel superior: FLCG corregida de NGC 2880. Panel inferior: FLCG corregida de la subpoblación azul de NGC 2880. Las líneas punteadas verticales indican los rangos en magnitud utilizados para los ajustes de la función gaussiana, la cual se encuentra representada mediante línea de trazos.

NGC 2880: la Figura 11.1 muestra la distribución de luminosidad que presentan los tres campos que conforman el mosaico de dicha galaxia. Allí se puede observar la diferencia que existe en el conteo de objetos en el extremo débil entre los campos 1 y 3, con respecto al campo 2. Esto se debe probablemente a la diferencia de *seeing* que presenta este último. Por ello, la construcción de la FLCG de NGC 2880 (Figura 11.4) se realizó utilizando el campo 1 (corregido por completitud) y el campo 3 para corregir por contaminación. Se estimó la ubicación del TO, a partir del módulo de distancia $(m - M) = 31.70 \pm 0.21$ mag (Tabla 2.1), y de las expresiones mencionadas en el caso de NGC 2549. El valor del mismo corresponde a $r'_0 = 24.03$ mag, acorde a lo que se observa en la Figura 11.4. De acuerdo a lo visto en la Sección 5.4, el 80% de completitud de la muestra se alcanza en la magnitud $r'_0 = 25.4$, por lo que el máximo observado en dicha figura corresponde con seguridad al TO. Para confirmar esto, se ajustó una función gaussiana (Expresión 11.1) a la FLCG corregida, en el rango $20 < r'_0 < 25.2$ mag. Los valores obtenidos para los mismos fueron $\mu_r = 24.32 \pm 0.20$ mag y $\sigma_r = 1.03 \pm 0.19$ mag, observando dicho ajuste en la Figura 11.4. Transformando el valor de TO $M_R = -7.9$ mag mediante la expresión de Lupton (2005), y utilizando el valor obtenido anteriormente de la magnitud aparente para la muestra total de CGs, se obtiene un módulo de distancia de $(m - M) = 31.97$ mag, el cual se encuentra en buen acuerdo tanto con el valor utilizado en esta Tesis, y con el obtenido por Theureau et al. (2007) de $(m - M) = 32.06 \pm 0.40$ mag a partir del método Tully-Fisher.

De la misma forma, se obtuvo la FLCG de las subpoblaciones azul y roja de NGC 2880. Sin embargo, debido al bajo número de candidatos que presenta esta última subpoblación,

la función de luminosidad obtenida presentó diferentes subestructuras sin evidencia clara de algún pico. Por ello, el análisis de la misma no fue incluido aquí. Por su parte, la FLCG y el ajuste gaussiano realizado en el intervalo $20 < r'_0 < 25.2$ mag sobre los candidatos azules se muestran en el panel inferior de la Figura 11.4. Los valores obtenidos en este caso resultaron en $\mu_r = 24.21 \pm 0.19$ mag y $\sigma_r = 0.97 \pm 0.17$ mag, resultando similar dentro de los errores al de la muestra completa de CGs.

NGC 2612: el bajo conteo de candidatos a CGs que se observa en la Figura 11.1, dificulta la ubicación del TO, aún más cuando se realizan las correcciones por completitud y contaminación correspondientes. Recordemos que, según vimos en el Capítulo 8, en particular esta última corrección es aproximada. Por ello, en la misma figura se muestran también las funciones de luminosidad crudas para el campo de comparación asociado a NGC 7626, y la obtenida a partir del conteo de objetos en base a los resultados del modelo de TRILEGAL. Al aplicar estas correcciones se obtiene una estimación de la FLCG para NGC 2612, en la cual como se muestra en la Figura 11.5, sobrevive un bajo número de objetos. En dicha figura, resulta muy evidente que ninguna de las dos estimaciones de contaminación individuales resulta adecuada. Si solo se utilizan los modelos de TRILEGAL, es claro que no se logra una corrección del extremo débil. Por otro lado, si solo se utilizan los conteos del campo de comparación asociado a NGC 7626, el resultado es que sobrevive un exceso de objetos brillantes (básicamente, estrellas de campo). Por tal motivo se adoptó aquí la combinación de ambas estimaciones de contaminación como una solución de compromiso.

Utilizando el módulo de distancia de $(m - M) = 31.8$ mag, el valor de TO de $M_V = -7.5$ mag y la ecuación (2) de Faifer et al. (2011), se estimó el valor esperado del TO para esta galaxia, el cual corresponde a $g'_0 = 24.7$ mag. Dado que no es posible ajustar la expresión 11.1 con los parámetros σ_g y μ_g libres, se fijó este último en $\mu_g = 24.7$ mag realizando el ajuste de la dispersión en el rango de magnitudes de $22.1 < g'_0 < 24.7$. El valor obtenido resultó en $\sigma_g = 1.26 \pm 0.24$ mag, siendo consistente con valores obtenidos para galaxias de tipo temprano (Jordán et al., 2007). Sin embargo, no debe perderse de vista que estos resultados han sido obtenidos en base a conteos extremadamente bajos.

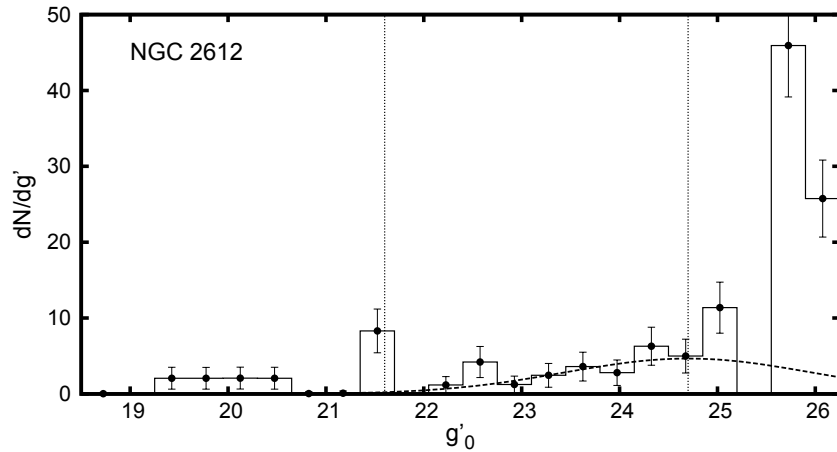


FIGURA 11.5: FLCG corregida de NGC 2612, aplicando la corrección mediante el campo de comparación de NGC 7626 y el modelo de TRILEGAL. Las líneas punteadas verticales indican el rango en magnitud utilizado para el ajuste de la función gaussiana, la cual se encuentra representada mediante línea de trazos.

NGC 4546: la Figura 11.1 muestra las distribuciones de luminosidad crudas de los tres campos que componen el mosaico de NGC 4546, junto con un campo *William Herschel Deep Field* (WHDF, por sus siglas en inglés), el cual se utilizó para estimar la contaminación en la galaxia. Este campo fue utilizado como campo de comparación en diversos trabajos (Faifer et al. 2011; Caso et al. 2015) dado que fue observado con el instrumento GMOS en los filtros $g'r'i'$, y además, como se observa en la Figura 11.1, la profundidad fotométrica obtenida en el mismo resulta similar a la de los campos de NGC 4546. La razón para utilizar aquí el mencionado campo, y no la zona empleada en las Secciones 7.2 y 8, radica en que, como se vio en dichas secciones, es evidente que los CGs azules de esta galaxia llenan nuestro mosaico.

De acuerdo al módulo de distancia adoptado $(m - M) = 30.73 \pm 0.14$ mag, el valor aproximado de TO de $M_R = -7.9$ mag y la expresión de Lupton (2005) utilizada en el caso de NGC 2549 y NGC 2880, se estima el valor del TO para esta galaxia en $r'_0 = 23.07$ mag. Sin embargo, al aplicar las correcciones por completitud y contaminación, la FLCG obtenida no muestra una caída evidente en los conteos hasta $r'_0 \sim 24$ mag (Figura 11.6). Para calcular la posición del pico en la FLCG se empleó la expresión 11.1, considerando el ajuste con los parámetros μ_r y σ_r libres para dos rangos en magnitudes. Por un lado $20 < r'_0 < 24.50$ mag, y por otro, $20 < r'_0 < 24.75$ mag. Esto se realizó así en un intento por evaluar el impacto de los últimos puntos del conteo sobre la ubicación del TO. Los valores obtenidos en ambos casos fueron de $\mu_r = 23.50 \pm 0.13$, $\sigma_r = 1.12 \pm 0.10$ y $\mu_r = 23.61 \pm 0.13$ y $\sigma_r = 1.20 \pm 0.11$ mag, respectivamente. La Figura 11.6 presenta dichos ajustes. A partir de estos valores obtenidos se volvió a calcular el módulo de distancia, resultando en $(m - M) = 31.63$ y $(m - M) = 31.74$ mag, encontrándose en buen acuerdo con el valor estimado por Theureau et al. (2007) de $(m - M) = 31.40 \pm 0.45$ mag, pero no con el de Tully et al. (2013) de $(m - M) = 30.73 \pm 0.14$ mag.

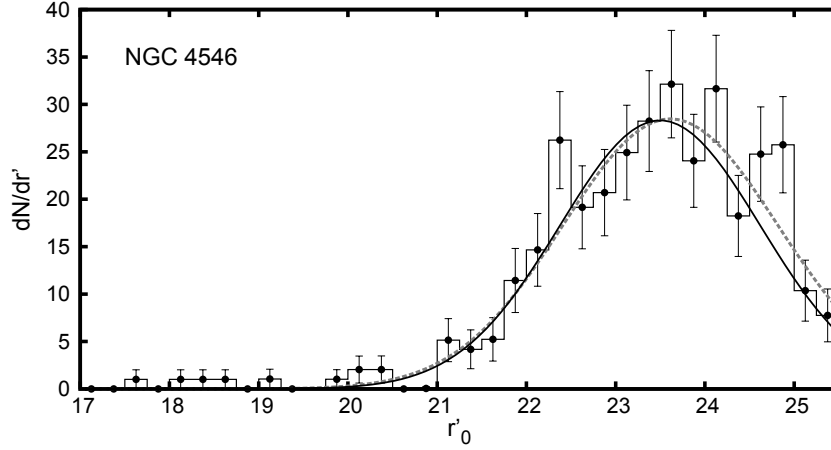


FIGURA 11.6: FLCG corregida de NGC 4546. Las líneas continua y de trazos representan las funciones gaussianas obtenidas considerando la libre variación de los parámetros en el ajuste, en los rangos de magnitudes mencionados en el texto.

NGC 3414: la Figura 11.1 muestra que el campo observado centrado en esta galaxia, se encuentra completamente dominado por la población de CGs de la misma. Por su parte, la Figura 11.7 muestra la FLCG corregida por completitud y contaminación, utilizando el campo de comparación para esto último. Hacia el extremo débil de magnitudes, puede observarse el efecto originado por las correcciones aplicadas, por lo que el ajuste de la función gaussiana se realizó desde $g'_0 = 21.3$ hasta $g'_0 = 26$ mag siendo este valor el correspondiente al 80% de completitud. Los valores obtenidos de dicho ajuste resultaron en $\mu_g = 25.06 \pm 0.13$ mag y $\sigma_g = 1.14 \pm 0.13$ mag, siendo el primero consistente dentro de los errores, con el obtenido por Kundu & Whitmore (2001) (ver Capítulo 2). De acuerdo al módulo de distancia adoptado para esta galaxia $((m - M) = 32.01 \pm 0.33$ mag), considerando el valor de TO $M_V = -7.5$ mag (Harris, 2001) y la expresión (2) de Faifer et al. (2011), se obtiene un valor estimado para el pico de la FLCG en $g'_0 = 24.88$ mag, estando en buen acuerdo dentro de los errores con el valor obtenido previamente. Por su parte, el valor obtenido de σ_g se encuentra acorde con la relación entre la dispersión gaussiana intrínseca de la FLCG en la banda- g' , y la magnitud absoluta azul de la galaxia anfitriona, $\sigma_g - M_B$ presentada en Jordán et al. (2007).

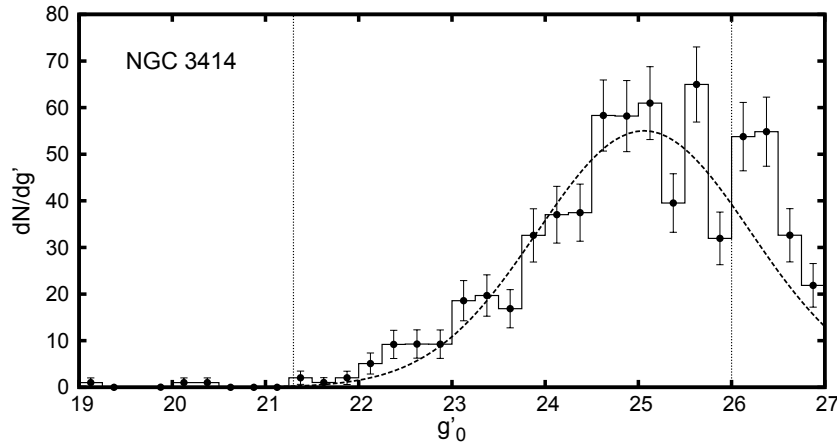


FIGURA 11.7: FLCG corregida de NGC 3414. Las líneas punteadas verticales indican el rango en magnitud utilizado para el ajuste de la función gaussiana, la cual se encuentra representada mediante línea de trazos.

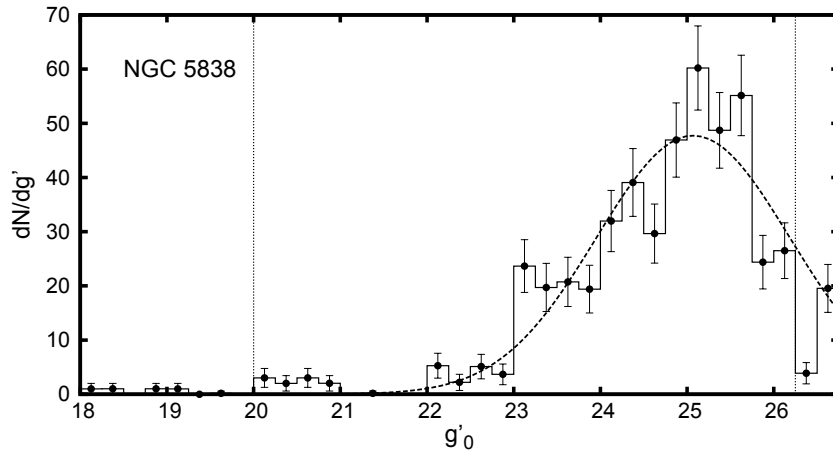


FIGURA 11.8: FLCG corregida de NGC 5838. Las líneas punteadas verticales indican el rango en magnitud utilizado para el ajuste de la función gaussiana, la cual se encuentra representada mediante línea de trazos.

NGC 5838: como se observa en la Figura 11.1, las distribuciones de luminosidad obtenidas en los tres campos de esta galaxia resultan similares, mostrando en el caso del campo 3, el pico debido a objetos débiles de fondo. Por ello, la construcción de la FLCG se realizó considerando los campos 1 y 2, y empleando el campo 3 para realizar la corrección por contaminación correspondiente. La Figura 11.8 muestra la FCLG corregida, la cual parece mostrar un posible máximo en $g'_0 \sim 25.2$ mag. La estimación del TO mediante el módulo de distancia adoptado de $(m - M) = 32.17$, resulta en $g'_0 = 25.04$ mag, cercano al valor correspondiente al 80% de completitud ($g'_0 = 25.5$ mag). El ajuste de la función gaussiana por su parte, se realizó considerando los parámetros libres, obteniéndose los valores $\mu_g = 25.07 \pm 0.10$ y $\sigma_g = 1.11 \pm 0.12$ mag. Dicho ajuste se muestra también en la Figura 11.8. Es de destacar aquí, que el valor μ_g estimado en esta Tesis se encuentra en buen acuerdo al valor esperado de TO.

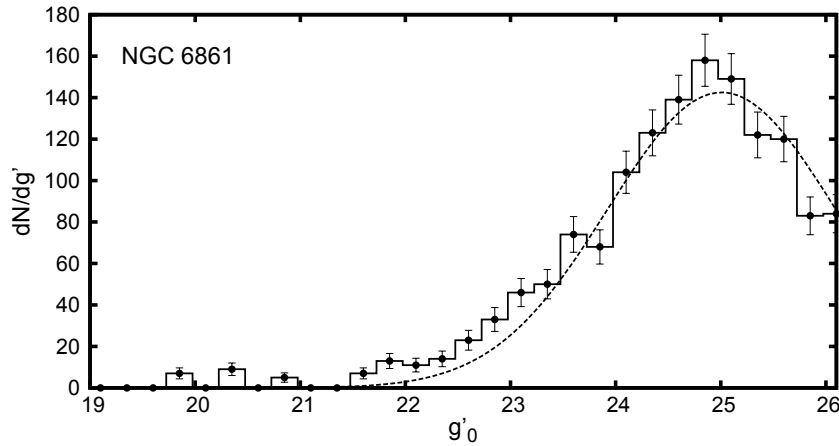


FIGURA 11.9: FLCG corregida de NGC 6861. La línea de trazos muestra la función gaussiana ajustada.

NGC 6861: la Figura 11.1 muestra los histogramas crudos de cada campo así como el campo correspondiente a NGC 6845 el cual es utilizado para la contaminación. La distancia adoptada para esta galaxia fue de 28.1 Mpc, que corresponde a un módulo de distancia de $(m - M) = 32.24$ mag. Por lo tanto, considerando un valor aproximado de TO de $M_V = -7.5$ mag (Harris, 2001), y utilizando la ecuación (2) de Faifer et al. (2011), se estima un valor para el pico de la FLCG en la banda g' de ~ 25.1 mag. Según se mostró en la Sección 5.4, se alcanza una completitud de 80% para $g'_0 = 25.5$ mag, con lo cual esto indica que el pico que se observa en la Fig. 11.9 corresponde con seguridad al TO. Para confirmar esto, se ajustó una función gaussiana al histograma corregido, determinando la posición de la magnitud de TO y la dispersión de la FLCG. En el ajuste, se incluyó hasta la magnitud $g'_0 = 26.2$ mag. Los valores obtenidos para los dos parámetros resultaron en $\mu_g = 25.00 \pm 0.05$ y $\sigma_g = 1.08 \pm 0.06$ mag, representados mediante la gaussiana en la Figura 11.9. El valor de σ_g se encuentra en muy buen acuerdo con la relación $\sigma_g - M_B$ (Jordán et al., 2007), al igual que en el caso de NGC 3414.

11.1.1 Efectos de la metalicidad sobre las funciones de luminosidad

Diversos estudios han encontrado diferencias significativas entre las magnitudes de TO para las funciones de luminosidad de los CGs azules y rojos, siendo los primeros ligeramente más brillantes en décimas de magnitudes en la banda V (Elson & Santiago 1996; Puzia et al. 1999; Larsen & Brodie 2000; Larsen et al. 2001; Di Criscienzo et al. 2006). Con el objetivo de verificar este efecto en los sistemas de CGs asociados a las galaxias estudiadas en esta Tesis, se obtuvo nuevamente la FLCG de cada subpoblación en aquellas galaxias que presentaban un número considerable de objetos. Las galaxias sobre las cuales se pudo realizar este análisis fueron NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861.

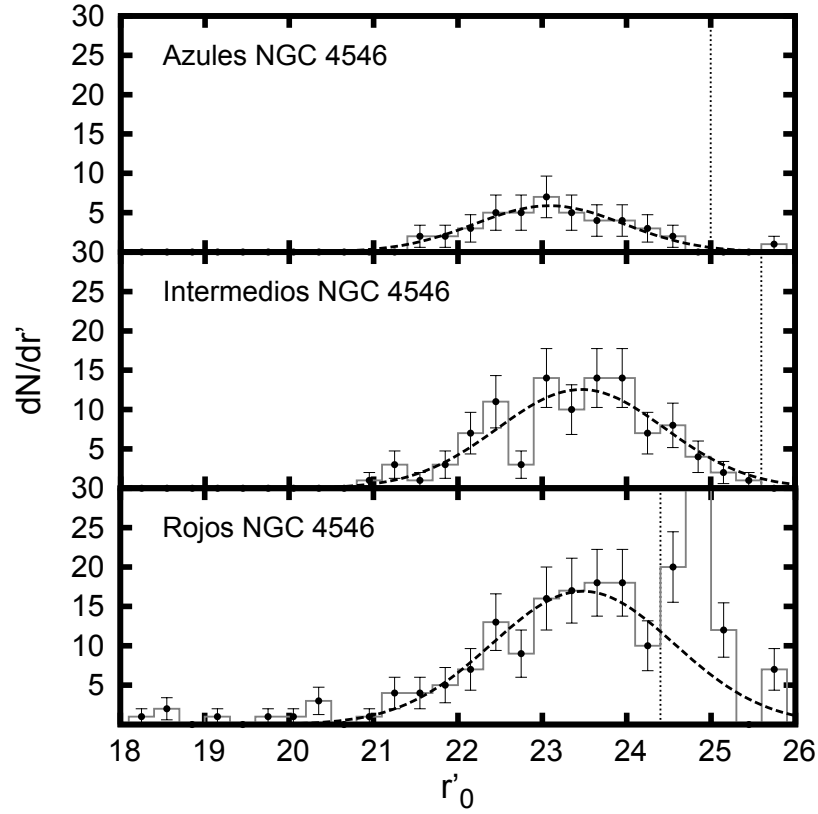


FIGURA 11.10: FLCG corregida para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 4546. Las líneas de trazos representan las funciones gaussianas obtenidas considerando la libre variación de los parámetros en el ajuste de los histogramas. Las líneas punteadas verticales indican los rangos en magnitud considerados para los ajustes.

La Figura 11.10 muestra los histogramas corregidos por completitud y contaminación para la subpoblación azul, intermedia y roja de NGC 4546, junto con el ajuste gaussiano obtenido en cada uno. Los valores de dichos ajuste se listan en la Tabla 11.1. Allí se observa que los valores de la magnitud de TO para la subpoblación intermedia y roja, resultan acordes al obtenido para la muestra completa. Sin embargo se evidencia una diferencia en el valor de TO obtenido para la subpoblación azul y las subpoblaciones anteriormente mencionadas, siendo la misma de $\text{TO}_{\text{rojo}} - \text{TO}_{\text{azul}} \sim 0.4$ mag.

Subpoblación	TO	σ
Azul	23.08 ± 0.06	0.89 ± 0.07
Intermedia	23.46 ± 0.13	0.99 ± 0.13
Roja	23.48 ± 0.13	1.07 ± 0.13

TABLA 11.1: Valores de TO y σ obtenidos mediante el ajuste de una función gaussiana a la FLCG de la subpoblación azul, intermedia y roja de NGC 4546.

Es inmediato pensar en la existencia de efectos de metalicidad detrás de este resultado. Ashman et al. (1995) han investigado el cambio en el pico de la FLCG como una función de metalicidad para los filtros B , V , R , I y J . Para ello, basaron sus resultados en simulaciones que incluían masas de cúmulos de una población similar a la de los cúmulos

de la Vía Láctea, y metalicidades medias desde -0.2 a -1.6 dex. De acuerdo a su tabla 3, y aceptando una metalicidad ($[\text{Fe}/\text{H}]$) media de -1.6 y -0.6 dex para los CGs azules (“pobres en metales”) y rojos (“ricos en metales”), respectivamente, se espera una diferencia de TO de alrededor de 0.2 mag en la banda R . Los CGs rojos en NGC 4546 son probablemente más ricos en metales que aquellos de la Vía Láctea, por lo que la diferencia de TO en esta galaxia S0 podría ser mayor. Desafortunadamente, Ashman et al. (1995) no incluyeron los filtros del Sloan en sus cálculos. Por esa razón, se han transformado en esta Tesis las magnitudes de TO para los CGs azules y rojos utilizando la ecuación de Lupton (2005) antes mencionada, adoptando los colores medios $(r' - i')_0 \sim 0.20$ y $(r' - i')_0 \sim 0.31$ mag, respectivamente. Esto se traduce en un cambio de 0.37 mag de la magnitud de TO en la banda R . Luego, si se supone que los CGs azules en NGC 4546 son similares a los de la Vía Láctea, de acuerdo con la fig. 7 de Rejkuba (2012), la metalicidad media de los CGs rojos en esta galaxia debe ser ~ -0.2 dex.

En el caso de NGC 3414, se muestran en la Figura 11.11 las FLCG y los ajustes gaussianos obtenidos para las subpoblaciones de CGs presentes en la misma. En este caso, se decidió considerar en forma conjunta a los candidatos rojos y aquellos que presentaban colores más rojos que $(g' - i')_0 > 1.2$ mag (Capítulo 8), debido al bajo número de estos últimos. El ajuste de la distribución gaussiana para esta subpoblación se obtuvo fijando el valor de la media en $g' = 25$ mag, el cual corresponde a la subpoblación intermedia, y dejando libre la dispersión. Esto se realizó debido a la no convergencia durante el ajuste considerando los parámetros libres. La Tabla 11.2 lista los valores obtenidos en los correspondientes ajustes.

Subpoblación	TO	σ
Azul	24.84 ± 0.10	1.20 ± 0.12
Intermedia	25.00 ± 0.27	1.18 ± 0.26
Roja	$25.00 \pm -$	0.90 ± 0.18

TABLA 11.2: Valores de TO y σ obtenidos mediante el ajuste de una función gaussiana a la FLCG de la subpoblación azul, intermedia y roja de NGC 3414.

Al fijar el pico de la subpoblación roja y comparar luego con el valor de TO de los cúmulos azules, la diferencia obtenida ($\text{TO}_{\text{int}} - \text{TO}_{\text{azul}} \sim 0.16$ mag) resulta menor al comparar con el caso de NGC 4546. Es decir, en NGC 3414 se obtiene una cota inferior para la diferencia entre los TO de ambas subpoblaciones, con lo cual aún nos estaría indicando una diferencia en metalicidad entre estas subpoblaciones.

Al igual que en el caso de NGC 4546 y NGC 3414 se obtuvieron las FLCG de las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 5838, las cuales se presentan en la Figura 11.12. Las mismas se encuentran corregidas por su correspondiente completitud y contaminación. Los valores obtenidos del ajuste gaussiano a cada histograma se listan en la Tabla 11.3. Nuevamente, al comparar las magnitudes de TO entre las subpoblaciones azul y roja, se

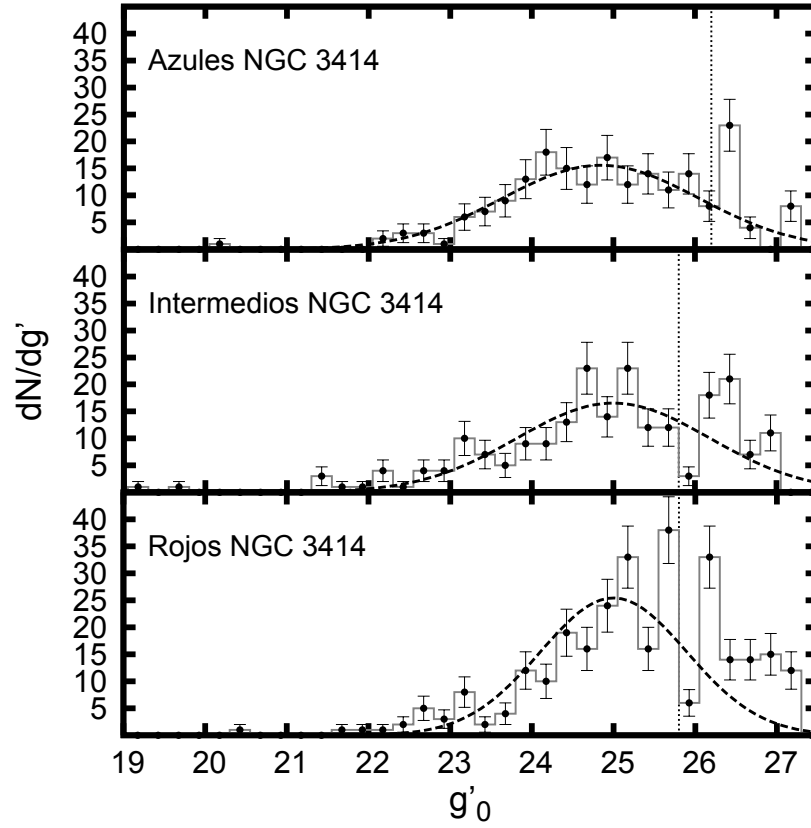


FIGURA 11.11: FLCG corregida para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 3414. Las líneas de trazos y punteadas representan las funciones gaussianas y los rangos en magnitud utilizados para los ajustes, respectivamente.

aprecia una diferencia significativa entre las mismas de $TO_{roja} - TO_{azul} \sim 0.33$ mag. Al transformar las magnitudes de TO para los CGs azules y rojos empleando la ecuación (2) de Faifer et al. (2011), y adoptando los colores medios $(g' - i')_0 = 0.78$ y $(g' - i')_0 = 1.05$ mag, respectivamente, se obtiene una diferencia de ~ 0.25 mag en la banda V . Como se mencionó en el caso de NGC 4546, este valor resulta acorde a una metalicidad media de -1.6 y -0.6 dex para los CGs azules y rojos, respectivamente. En aquellos candidatos que presentaban colores más rojos ($(g' - i')_0 \geq 1.21$ mag), debido a la incerteza en la linealidad de la ecuación (2) de Faifer et al. (2011) para estos colores, no se puede asegurar que la estimación de metalicidad para estos candidatos sea adecuada.

Subpoblación	TO	σ
Azul	24.80 ± 0.11	1.39 ± 0.13
Roja	25.13 ± 0.05	0.95 ± 0.06
+Roja	25.12 ± 0.06	0.81 ± 0.07

TABLA 11.3: Valores de TO y σ obtenidos mediante el ajuste de una función gaussiana a la FLCG de la subpoblación azul, roja y con colores más rojos de NGC 5838.

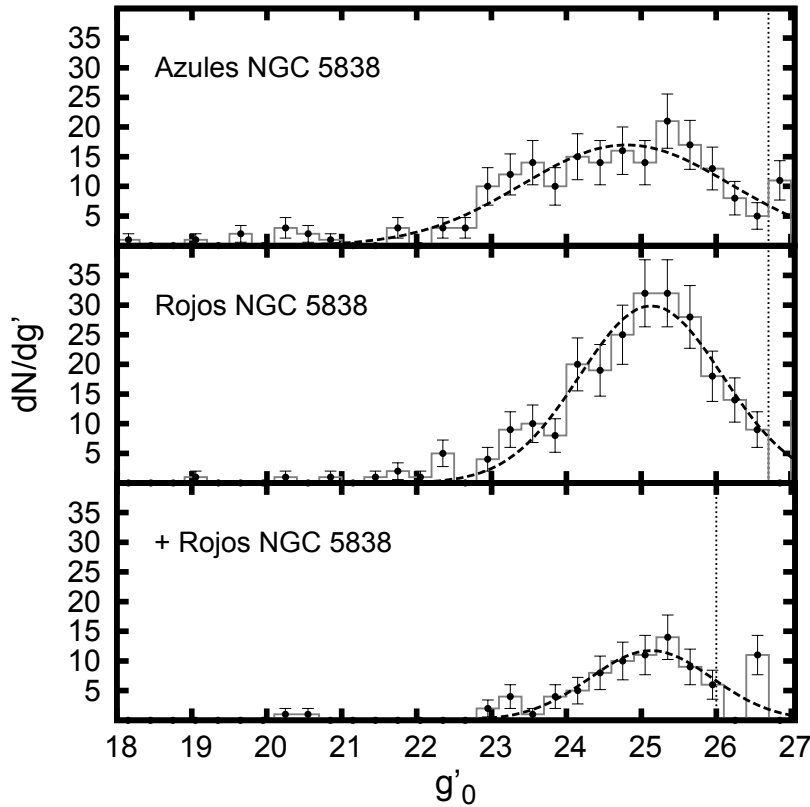


FIGURA 11.12: FLCG corregida para las diferentes subpoblaciones de CGs en NGC 5838. Las líneas de trazos representan las funciones gaussianas obtenidas considerando la libre variación de los parámetros en el ajuste de los histogramas. Las líneas punteadas verticales indican la magnitud límite utilizada para los respectivos ajustes.

Finalmente, el último caso de nuestra muestra en el que fue posible estimar la posición del TO para las diferentes subpoblaciones es NGC 6861. La Figura 11.13 muestra los histogramas corregidos por contaminación y completitud para las subpoblaciones azul, intermedia y roja, así como los modelos gaussianos ajustados. Los valores de los parámetros obtenidos se enumeran en la Tabla 11.4. Al igual que en el caso de NGC 4546 y NGC 5838 se ha obtenido una diferencia significativa entre las magnitudes del TO para los cúmulos azules y rojos. Podemos ver en la Tabla 11.4 que $TO_{rojo} - TO_{azul} \sim 0.33$ mag. Si bien el ajuste obtenido de la FLCG para la subpoblación intermedia mostraría un TO más débil en comparación con la subpoblación roja, el exceso de objetos brillantes ($g'_0 \sim 23$ mag) y el valor obtenido de TO cercano al valor correspondiente al 80% de completitud de la muestra, indicaría que dicha subpoblación no se ajusta adecuadamente mediante la distribución gaussiana.

Transformando las magnitudes de TO de las subpoblaciones azul y roja a la banda V empleando la ecuación (2) de Faifer et al. (2011) y adoptando los colores medios $(g' - i')_0 = 0.78$ y $(g' - i')_0 = 1.13$ mag, respectivamente, se obtiene un cambio de 0.21 mag de la magnitud de TO. Si se supone nuevamente que los CGs azules en NGC 6861

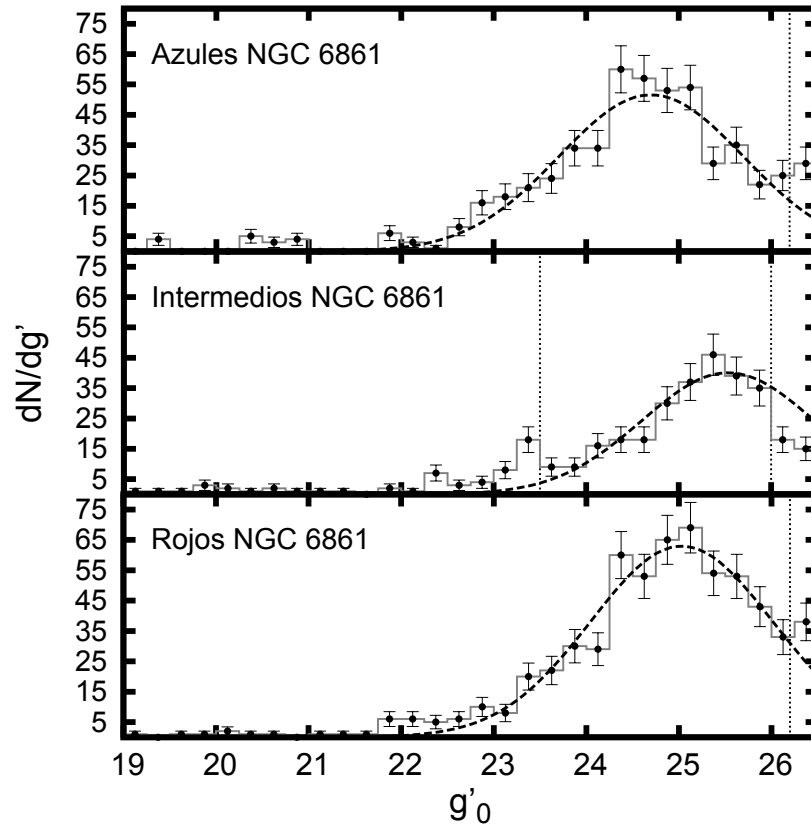


FIGURA 11.13: FLCG para la subpoblación azul, intermedia y roja en NGC 6861. Las líneas de trazos muestran las funciones gaussianas ajustadas en cada caso. Las líneas punteadas verticales indican los rangos en magnitud considerados para los ajustes.

son similares a los de la Vía Láctea, de acuerdo con la fig. 7 de Rejkuba (2012), la metalicidad media de los CGs rojos en esta galaxia debe ser ~ -0.70 dex.

Subpoblación	TO	σ
Azul	24.70 ± 0.06	1.00 ± 0.07
Intermedia	25.53 ± 0.15	0.93 ± 0.13
Roja	25.03 ± 0.05	0.98 ± 0.05

TABLA 11.4: Valores de TO y σ obtenidos mediante el ajuste de una función gaussiana a la FLCG de la subpoblación azul, intermedia y roja de NGC 6861.

Estos resultados muestran que es posible medir el efecto de la metalicidad sobre los TO de las FLCG. Si bien los mismos resultan esperables al aceptar que las diferentes subpoblaciones que se identifican en las distribuciones de color integrado, son en realidad distintas poblaciones separadas en metalicidad, es destacable que se ha podido medir dicho efecto para todas las galaxias de la muestra que cuentan con un buen número de CGs. Esto probablemente muestra la alta calidad de la fotometría obtenida, y la buena clasificación de objetos que se realizó. El análisis realizado aquí sobre la FLCG de las diferentes subpoblaciones de CGs, aporta información relevante en este tipo de estudios, los cuales resultan escasos en la literatura.

Otro aspecto interesante de nuestros resultados es que no es una buena práctica estimar distancias utilizando la FLCG obtenida para la muestra global de CGs. Sobre todo, si las bandas fotométricas en las que se trabaja están del lado azul del espectro óptico. Para minimizar el efecto de la metalicidad, sería conveniente observar en el régimen del infrarrojo cercano (Villegas et al., 2010). Sin embargo, otra opción es utilizar la magnitud de TO de los CGs azules como un indicador de distancia. Di Criscienzo et al. (2006) han mostrado que la adopción de una escala de distancia común para la Nube Mayor de Magallanes de $(m - M) = 18.50$ mag, la magnitud de TO de la FLCG pobres en metales en la Vía Láctea, M31 y para la muestra de galaxias más distante de Larsen et al. (2001), están en perfecto acuerdo con $M_V = -7.66$ mag.

Utilizando este valor de M_V correspondiente a los CGs azules, se estimaron las distancias a NGC 4546, NGC 3414, NGC 5838 y NGC 6861. A continuación se detalla el proceso y los resultados en cada caso.

En el caso de NGC 4546 se obtuvo para la subpoblación azul un valor de $TO_{\text{azul}} = 23.08$ mag; luego, transformando el valor utilizado en la Sección 11.1 de $M_R = -7.9$ mag (Richtler 2003; Rejkuba 2012) mediante la expresión de Lupton (2005) y considerando el valor medio $(r' - i')_0 \sim 0.20$ mag para dicha subpoblación, se obtiene $M_r = -7.69$ mag. A partir de este valor y la magnitud aparente del TO para la subpoblación azul, se obtiene el módulo de distancia $(m - M) = 30.77$ mag, el cual resulta acorde con el valor de Tully et al. (2013) ($(m - M) = 30.73 \pm 0.14$ mag).

El valor obtenido para la subpoblación azul de NGC 3414 resultó en $TO_{\text{azul}} = 24.84$ mag. Utilizando la magnitud de TO de Di Criscienzo et al. (2006) y la expresión de Faifer et al. (2011) con el valor medio en color $(g' - i')_0 \sim 0.76$ mag para dicha subpoblación, se obtiene $M_g = -7.37$ mag. Luego, el módulo de distancia obtenido para NGC 3414 resulta en $(m - M) = 32.21$ mag, encontrándose en buen acuerdo con el obtenido por Tonry et al. (2001) de $(m - M) = 32.01 \pm 0.33$ mag mediante el método de fluctuaciones de brillo superficial.

Para NGC 5838 se transformó el valor $M_V = -7.66$ mag (Di Criscienzo et al. 2006; Larsen et al. 2001) a la banda g' , obteniéndose $M_g = -7.37$ mag. A partir de este valor y la magnitud aparente para el TO de la FLCG azul (Tabla 11.3), el módulo de distancia obtenido es de $(m - M) = 32.17$ mag. Dicho valor se encuentra en excelente acuerdo con el de Theureau et al. (2007) de $(m - M) = 32.17 \pm 0.45$ mag.

Finalmente, se estimó el módulo de distancia a NGC 6861 utilizando los cúmulos azules. A partir de la magnitud de TO de Di Criscienzo et al. (2006), el correspondiente valor medio en color $(g' - i')_0$ de la Tabla 8.6 y usando la ecuación (2) del trabajo de Faifer et al. (2011), se obtiene $M_g = -7.39$ mag. Este valor y la magnitud aparente para el TO de la FLCG azul ($TO_{\text{azul}} = 24.70$ mag), resulta en un módulo de distancia de

$(m - M) = 32.1$ mag. El mismo se encuentra en buen acuerdo con el valor de Tonry et al. (2001), $(m - M) = 32.24 \pm 0.36$ mag.

Capítulo 12

Número total de CGs y frecuencia específica

A partir de la información obtenida de los perfiles de densidad de los diferentes sistemas de CGs (Sección 9.2) y del análisis de las FLCGs (Sección 11.1), se puede estimar para cada galaxia la población total de CGs (N_{tot}) y la frecuencia específica (S_N) definida por Harris & van den Bergh (1981), como:

$$S_N = N_{\text{tot}} 10^{0.4(M_V+15)} \quad (12.1)$$

siendo M_V la magnitud integrada de la galaxia. Esta expresión representa el número de CGs normalizada por la luminosidad de la galaxia, la cual facilita la comparación entre diversos sistemas de CGs con historias de formación estelar diferentes (como galaxias espirales y elípticas), y por lo tanto diferentes cocientes masa-luminosidad (M/L) en sus poblaciones estelares. Los errores asociados con dicha expresión vienen dados por la propagación de errores con la siguiente forma:

$$\sigma = 10^{0.4(M_V+15)} \sqrt{\sigma_{N(\text{tot})}^2 + (0.4 \cdot N_{\text{tot}} \cdot \ln 10)^2 \cdot \sigma_{M_V}^2} \quad (12.2)$$

Otro estimador utilizado comúnmente en la literatura, definido por Zepf & Ashman (1993), es el parámetro T , definido por:

$$T \equiv \frac{N_{\text{tot}}}{M_G/10^9 M_\odot} \quad (12.3)$$

siendo M_G la masa estelar de la galaxia. Sin embargo, aquí no utilizaremos este último estimador debido a que no se cuenta con valores de las masas de las galaxias de la muestra.

Inicialmente, para estimar la población total es necesario integrar el perfil de densidad (ley de potencia) de la muestra total de cúmulos en cada galaxia, dentro de un determinado radio y luego multiplicar ese valor por la fracción de la FLCG que es más débil que el límite observado. En este trabajo, se utilizaron como radios galactocéntricos máximos, 50 y 100 kpc. El primer valor se consideró por ser un valor razonable a fin de incluir la mayoría de los CGs asociados con una galaxia de baja masa (Faifer et al., 2011). Por su parte el radio hasta 100 kpc, resulta apropiado en el caso de galaxias masivas con sistemas de cúmulos muy extendidos (Bassino et al. 2006; Escudero et al. 2015a). Como se mostró en la Sección 9.2, los perfiles presentan pendientes diferentes hacia las regiones internas, en varios casos en forma de “core”. En el caso de contar con imágenes de alta resolución espacial, sería posible establecer con seguridad en cada caso si dicho “core” es real, o si se trata únicamente de un efecto de completitud. Dado que no contamos con datos de ese tipo para ninguna de las galaxias de la muestra estudiada, se optó por una solución de compromiso y se adoptó un valor de densidad constante en la zona central de cada galaxia. Esto, si bien es una aproximación, resulta aceptable debido a que el área afectada es muy pequeña en comparación al área total sobre la cual se integra cada perfil de densidad superficial.

En la Tabla 12.1 se listan los valores esperados de CGs al realizar la integración del perfil de densidad de cada sistema, los radios galactocéntricos utilizados en la integración, la población total de CGs luego de considerar el factor obtenido de la FLCG y la frecuencia específica asociada.

Galaxia (1)	N_{CG}^{50} (2)	N_{CG}^{100} (3)	N_{tot} (4)	S_N (5)
NGC 2549	206 (<820)	231 (<1640)	238 ± 10 / 263 ± 20	4.0 ± 0.6 / 4.4 ± 0.7
NGC 2880	312 (<472)	426 (<943)	390 ± 60 / 532 ± 130	3.3 ± 0.7 / 4.5 ± 1.2
NGC 2612	91 (<450)	103 (<900)	123 ± 30 / 140 ± 30	1.0 ± 0.3 / 1.1 ± 0.3
NGC 4546	315 (<781)	337 (<1562)	400 ± 50 / 426 ± 60	2.6 ± 0.5 / 2.8 ± 0.5
NGC 3414	653 (<406)	749 (<813)	826 ± 100 / 948 ± 180	3.0 ± 0.5 / 3.4 ± 0.6
NGC 5838	524 (<410)	665 (<820)	806 ± 100 / 1023 ± 200	2.6 ± 0.4 / 3.2 ± 0.7
NGC 6861	—	1994 (<600)	— / 3000 ± 300	— / 9.2 ± 2.2

TABLA 12.1: Población total de CGs para cada galaxia. Columnas: (1) galaxias de la muestra; (2)-(3) número de CGs obtenidos luego de integrar el perfil de densidad hasta los radios 50 y 100 kpc. Entre paréntesis se indica el valor correspondiente en segundos de arco; (4) población total de CGs luego de la corrección mediante la FLCG en los radios máximos antes mencionados; (5) frecuencia específica obtenida para ambos radios. Los valores obtenidos para NGC 2549 corresponden a una cota inferior, según se explica en el texto.

En el caso de NGC 2549, dado que su FLCG presenta un comportamiento exponencial (ver Figura 11.2), no fue posible estimar la población total a partir de la misma. Por ello, los valores listados en la Tabla 12.1 corresponden a una cota inferior en la población total, es decir dichos valores son los obtenidos solamente a partir de la integración del perfil de densidad. De la misma manera, al calcular la frecuencia específica con su error

asociado se obtienen cotas inferiores de $S_N = 4.0 \pm 0.6$ y $S_N = 4.4 \pm 0.7$ para los radios máximos de 50 y 100 kpc, respectivamente.

Para la galaxia NGC 2880 el ajuste realizado a la FLCG indica que los CGs más brillantes que $r'_0 = 25.2$ mag (ver Tabla 7.1), los cuales fueron incluidos en la determinación del correspondiente perfil de densidad superficial, representan el 80 por ciento de la población total. Con lo cual, dicha población total se estima en $N_{\text{tot}} = 390 \pm 60$ y $N_{\text{tot}} = 532 \pm 130$ CGs para los dos radios máximos considerados. De acuerdo al valor de magnitud absoluta $M_V = -20.17$, se obtiene $S_N = 3.3 \pm 0.7$ y $S_N = 4.5 \pm 1.2$, respectivamente.

En el caso de NGC 2612, es necesario recordar que su FLCG presenta un conteo bajo, sin embargo se logró ajustar una función gaussiana a la misma (ver Sección 11.1, Fig. 11.5). De acuerdo a la función de luminosidad ajustada en la Sección 11.1, los valores obtenidos de la integración del perfil (columnas (2) y (3) en Tabla 12.1) corresponden al 74 por ciento de la población total. Esto es, los objetos incluidos en el perfil, los cuales son más brillantes que $g'_0 = 25.5$ mag (80% completitud; Tabla 7.1), corresponden al porcentaje antes mencionado. Luego la población total en NGC 2612 se estima en $N_{\text{tot}} = 123 \pm 30$ (hasta 50 kpc) y $N_{\text{tot}} = 140 \pm 30$ CGs (hasta 100 kpc). Estos valores corresponden con $S_N = 1.0 \pm 0.3$ y $S_N = 1.1 \pm 0.3$, al considerar una magnitud para la galaxia de $M_V = -20.20$ mag.

En NGC 4546, los valores estimados en la población de CGs mediante la integración del perfil de densidad, corresponden al 79 por ciento de la muestra de CGs más brillante que $r'_0 = 24.6$ mag, de acuerdo al valor obtenido del ajuste gaussiano realizado en la Sección 11.1. Por ello, los valores estimados para la población total en los radios 50 y 100 kpc resultan en $N_{\text{tot}} = 400 \pm 50$ y $N_{\text{tot}} = 426 \pm 60$ CGs, respectivamente. Considerando la magnitud absoluta de la galaxia $M_V = -20.45$, estos valores se traducen en frecuencias específicas de $S_N = 2.6 \pm 0.5$ y $S_N = 2.8 \pm 0.5$, respectivamente.

En el caso particular de NGC 3414, la integración del perfil resulta en 653 y 749 CGs para ambos radios galactocéntricos máximos. A partir de los parámetros obtenidos en el ajuste de la FLCG, resulta que los objetos incluidos en los ajustes de los perfiles de densidad (objetos más brillante que $g'_0 = 26$ mag), corresponden al 79 por ciento de todos los CGs de este sistema. Con ello se estima una población total para esta galaxia en $N_{\text{tot}} = 826 \pm 100$ y $N_{\text{tot}} = 948 \pm 180$ CGs, respectivamente. Utilizando la magnitud de NGC 3414 $M_V = -21.11$ y los valores de población de CGs antes mencionados, se estima una frecuencia específica en $S_N = 3.0 \pm 0.5$ y $S_N = 3.4 \pm 0.6$, respectivamente. Como se mencionó en el Capítulo 2, esta galaxia presentaba un estudio previo realizado por Kundu & Whitmore (2001) sobre el sistema de CGs utilizando la WFPC2. Estos autores obtuvieron una frecuencia específica local de $S_{N(\text{local})} = 1.6 \pm 0.6$. Luego, se utilizó la ecuación (3) de Aragón-Salamanca et al. (2006) para comparar el valor obtenido por

Kundu & Whitmore (2001) con los de esta Tesis. Dicha expresión dada por:

$$\frac{S_N^{\text{local}}}{S_N^{\text{global}}} = 5.71 + 0.25 M_V, \quad (12.4)$$

relaciona las frecuencias específicas local y global en función de la magnitud absoluta de la galaxia (usualmente para galaxias con $M_V < -20$ mag). El valor obtenido resulta en $S_N^{\text{global}} = 3.7$, estando en buen acuerdo con el obtenido aquí para el radio de 100 kpc.

De acuerdo al ajuste gaussiano realizado sobre la FLCG de NGC 5838, el 65 por ciento de los objetos más brillantes que $g'_0 = 25.5$ mag se corresponderían a 524 y 665 CGs obtenidos de la integración del perfil de densidad dentro de los radios de 50 y 100 kpc. Con lo cual, la población total para esta galaxia sería de $N_{\text{tot}} = 806 \pm 100$ y $N_{\text{tot}} = 1023 \pm 200$ CGs, respectivamente. Según el valor adoptado de magnitud absoluta $M_V = -21.24$, las frecuencias específicas resultan $S_N = 2.6 \pm 0.4$ y $S_N = 3.2 \pm 0.7$.

En el caso de NGC 6861, la integración del perfil se consideró únicamente hasta 100 kpc, debido a que el análisis presentado en la Sección 9.2 mostró que hay CGs incluso a esa distancia. Los 1994 CGs obtenidos de la integración, según los parámetros obtenidos para la FLCG, se corresponde al 67 por ciento más brillante de la población total. Teniendo en cuenta una variación de ± 20 por ciento en la extensión del perfil de densidad debido a las incertezas en sus parámetros, al integrar el perfil de la FLCG sobre todo el rango de magnitudes, se estima un total de 3.000 ± 300 CGs. De acuerdo a la magnitud absoluta $M_V = -21.27$ y el número total de CGs se obtuvo una frecuencia específica de $S_N = 9.2 \pm 2.2$, resultando en un valor sorprendentemente alto. Por otro lado, si se adopta el módulo de distancia obtenido de la magnitud de TO para los CGs azules, mencionado en la Sección 11.1, se obtiene $M_V = -21.12$ mag y una $S_N = 10.6 \pm 2.1$. Estos valores de S_N son extremadamente altos, similares a los hallados para galaxias de tipo temprano localizadas en cúmulos, como por ejemplo M87. Harris et al. (2013) presentan una recopilación de propiedades globales de sistemas de CGs, donde sólo dos galaxias S0 en esa muestra, con $D < 100$ Mpc y $M_V < -20$ mag, poseen $S_N > 7$, siendo las mismas NGC 1400 e IC 3651. Comprobando la fuente de esos valores, podemos ver que en el caso de NGC 1400, Perrett et al. (1997) encontraron un valor de $N_{\text{tot}} = 922 \pm 280$ CGs y una $S_N = 5.2 \pm 2$. Por otro lado, Marín-Franch & Aparicio (2002) listan un valor de $S_N = 5.7 \pm 1.8$ para IC 3651. Sin embargo, estos valores se basan en estimaciones indirectas tanto de M_V como del N_{tot} , utilizando el método de fluctuaciones de brillo superficial. En este contexto, NGC 6861 parece ser el caso más claro de una galaxia lenticular de alta S_N .

Valores altos de S_N se encuentran generalmente en galaxias de tipo temprano de baja y alta masa. Esto es evidente en la forma de U que aparece de los gráficos de S_N versus M_V , como por ejemplo en la fig. 10 presentada en Harris et al. (2013). Como S_N mide la eficiencia de formación de CGs con relación a las estrellas de campo, las galaxias con alto

S_N pueden entenderse como “deficientes en estrellas de campo” o como sistemas “ricos en cúmulos”. Sin embargo, varios estudios proporcionan evidencia creciente a favor de la primera situación. Específicamente, McLaughlin (1999) ha demostrado que el valor S_N para las galaxias más masivas en su muestra se puede explicar si la masa de los CGs se normaliza a la masa bariónica total de la galaxia anfitriona (es decir, la componente estelar y el gas emitiendo en rayos X), $\epsilon = M_{\text{SCG}}/M_b \sim 0.0026$. En este contexto, según su valor de S_N , NGC 6861 podría tener un halo bariónico masivo asociado con el gas caliente que emite en rayos X.

Recientemente, fue definida una relación más fundamental, la cual involucra el cociente de la masa en los CGs con respecto a la masa total de halo de la galaxia, $\eta = M_{\text{CGs}}/M_h$. Esta relación parece ser esencialmente constante sobre todo el rango de masa de las galaxias (Georgiev et al. 2010; Harris et al. 2013). Utilizando una completa base de datos de 307 galaxias, Hudson et al. (2014) confirmaron esto mediante una nueva calibración de las masas de halos de galaxias, empleando para ello lentes gravitacionales débiles, obteniendo un valor de $\langle\eta\rangle = 3.9 \pm 0.9 \times 10^{-5}$. Siguiendo la metodología de Harris et al. (2013), se estimó la masa total encerrada en el sistema de CGs de NGC 6861 (adoptando $(M/L)_V = 2$), siendo $M_{\text{CG}} = 9 \pm 1 \times 10^8 M_\odot$. A partir del mismo y utilizando luego el valor de $\langle\eta\rangle$ para estimar la masa total del halo de dicha galaxia, se encuentra un valor de $M_h = 2.3 \pm 0.5 \times 10^{13} M_\odot$, el cual indica una vez más que, de acuerdo con su sistema de CGs, podemos esperar un halo masivo en NGC 6861.

Capítulo 13

Estudio complementario en NGC 6861

13.1 Relación color-luminosidad

Según lo mencionado en el Capítulo 10, la relación color-magnitud (*blue-tilt*) que parecen seguir los CGs azules en algunas galaxias, se observa también en los candidatos azules de NGC 6861 (Fig. 7.3). Esta relación ha sido interpretada como un incremento de la metalicidad con la masa de los CGs, es decir, una relación masa-metalicidad (RMM). La explicación física para el *blue-tilt* fue propuesta por Strader & Smith (2008) y Bailin & Harris (2009), basada en el autoenriquecimiento durante la etapa de formación de los cúmulos, donde la formación estelar se encuentra influenciada por la retroalimentación de las supernovas dentro del protocúmulo. Sin embargo, aún existen ciertos aspectos poco claros en referencia a este fenómeno. Por ejemplo, si bien se ha argumentado que el fenómeno está presente en todos los sistemas de CGs, y que en algunos casos no se observa debido al escaso número de CGs azules, existen ejemplos como el de NGC 1399 que demuestran que esto no es del todo cierto (Forte et al., 2007). Por ello, resulta un aporte interesante analizar en mayor detalle tal fenómeno en NGC 6861.

Con el objetivo de caracterizar esta RMM en NGC 6861, la muestra de candidatos a CGs fue dividida en diferentes intervalos de magnitudes, conteniendo 100 objetos en cada uno de ellos. Posteriormente, se empleó RMIX para obtener la ubicación de los picos en cada intervalo para las tres subpoblaciones mencionadas en el Capítulo 8. En este caso, se utilizó el modo homocedástico para facilitar la convergencia (los tres modelos poseen iguales dispersiones), comprobando con intervalos de diferentes anchos. En la Figura 13.1 se muestran como ejemplo, los valores medios obtenidos para los candidatos

azules, intermedios y rojos considerando un intervalo de 0.075 mag en el diagrama color-magnitud i'_0 versus $(g' - i')_0$. La figura muestra que, como fue intuido previamente del diagrama color-magnitud, el pico azul se torna más rojo a luminosidades mayores.

Harris (2009a) encuentra evidencias de que el *blue-tilt* en M87 comienza a ser detectable a partir de magnitudes más brillantes que $M_I = -9.5$, exhibiendo un comportamiento no lineal. Utilizando la ecuación (1) de Faifer et al. (2011) y la distancia adoptada para NGC 6861, se obtuvo el valor equivalente de $i'_0 \sim 23.24$ mag. En cuanto a la pendiente del *tilt* obtenida por Harris, fue de $d(g' - i')_0/di'_0 = -0.021 \pm 0.004$. Sin embargo, valores ligeramente más grandes se obtuvieron para otras galaxias. Por ejemplo, Faifer et al. (2011) encontraron $d(g' - i')_0/di'_0 = -0.032 \pm 0.003$ (para luminosidad $M_I < -9.5$) para la galaxia elíptica gigante M60, y Wehner et al. (2008) encontraron $d(g' - i')_0/di'_0 = -0.044 \pm 0.011$ (para luminosidad $M_I < -9$) para NGC 3311. Para comparar con los diferentes valores encontrados en la literatura, se realizaron ajustes lineales por mínimos cuadrados al color de la subpoblación azul como función de las magnitudes g'_0 e i'_0 . Se utilizó esta forma funcional como un enfoque a primer orden debido a que emplear funciones de mayor orden carece de sentido para la muestra de puntos con la que se cuenta. Como ejemplo, se listan a continuación los ajustes obtenidos considerando toda la muestra de puntos, descartando los puntos mas débiles que $i'_0 = 23.3$ mag ($M_I \sim -9.5$ mag) y aquella descartando solamente el punto más brillante:

$$(g' - i')_0 = -0.026(\pm 0.007)i'_0 + 1.385(\pm 0.163) \quad (13.1)$$

$$(g' - i')_0 = -0.025(\pm 0.011)i'_0 + 1.358(\pm 0.268) \quad (13.2)$$

$$(g' - i')_0 = -0.025(\pm 0.009)i'_0 + 1.344(\pm 0.232) \quad (13.3)$$

Aunque el comportamiento de los datos en el extremo débil no es muy claro, se puede ver que las pendientes para los diferentes ajustes son similares. Por lo tanto, se adoptó como pendiente para el *blue-tilt* en NGC 6861 el primer valor, es decir $d(g' - i')_0/di'_0 = -0.026 \pm 0.007$. Nuevamente, para comparar estos resultados con los de la literatura, se ejecutó RMIX forzando un ajuste bimodal a la distribución, considerando la misma muestra empleada para el caso trimodal. En esta ocasión, también se utilizó el caso heterocedástico (se permiten diferentes dispersiones), donde los picos resultantes del ajuste de dos gaussianas para los diferentes intervalos se muestran en la Figura 13.1. En el mismo se observa que los picos azules se recuperan claramente, siendo cercanos a los puntos obtenidos en el caso trimodal. Por otro lado, los picos rojos se ubicaron entre los candidatos intermedios y rojos del caso trimodal. Un ajuste lineal a los puntos azules considerando toda la muestra da $(g' - i')_0 = -0.021(\pm 0.011)i'_0 + 1.258(\pm 0.257)$. Cuando solo se incluyen los puntos más brillantes que $i'_0 = 23.3$, el ajuste resulta en $(g' - i')_0 = -0.033(\pm 0.010)i'_0 + 1.539(\pm 0.239)$. Dentro de los errores, estos valores son

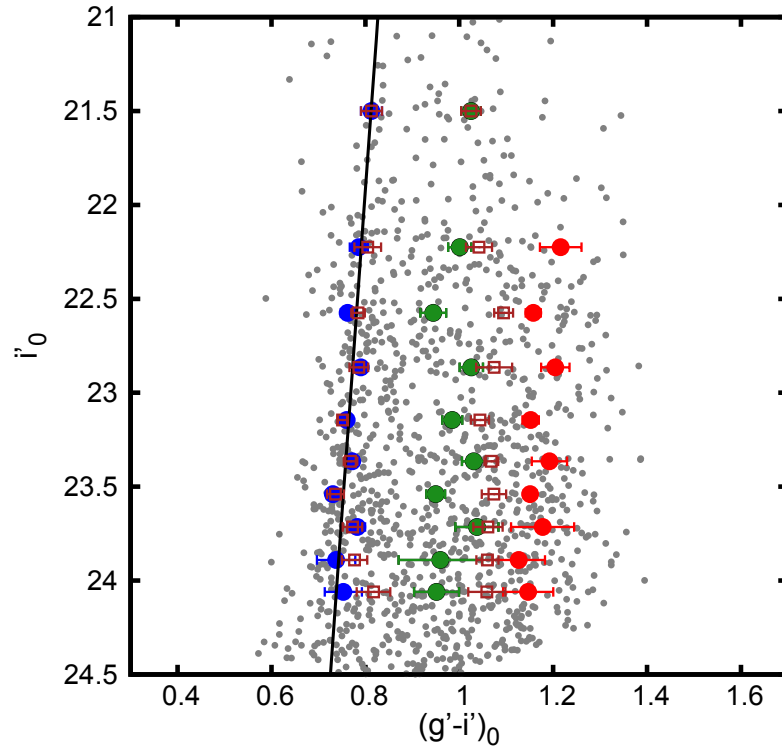


FIGURA 13.1: Con línea negra se presenta el *blue-tilt* en NGC 6861 para el caso trimodal. Los círculos llenos azules, verdes y rojos representan los picos en el color $(g' - i')_0$ obtenido por RMIX para las subpoblaciones azul, intermedia y roja, respectivamente. Los cuadrados marrones corresponden a los picos en el color en el caso bimodal para las subpoblaciones azul y roja.

los mismos que los de las ecuaciones 13.1-13.3 y similares a los obtenidos para diferentes galaxias elípticas, como fue mencionado anteriormente.

Los valores adoptados para el *blue-tilt* en los casos bimodal y trimodal no necesariamente implican que la RMM sea lineal para NGC 6861. Las pruebas indican que la pendiente, considerando diferentes submuestras, parece disminuir a medida que se consideran magnitudes mas débiles en el diagrama color-magnitud (como se encuentra en otras galaxias presentadas por Mieske et al. 2010 y Harris 2009a). Sin embargo, los errores asociados con esas estimaciones son demasiado grandes, indicando que probablemente se necesite una muestra más profunda para obtener resultados concluyentes. Por esta razón, en este trabajo se decidió comparar estos resultados solo con estimaciones de ajustes lineales de la literatura.

Como se mencionó anteriormente, las diferentes estimaciones encontradas en la literatura sobre el *blue-tilt*, mayormente para galaxias elípticas, son similares a los obtenidos aquí. Esto es así incluso cuando se comparan las pendientes obtenidas con otras combinaciones de filtros fotométricos. Por ejemplo, los resultados de Usher et al. (2013) para NGC 4278, o los de Mieske et al. (2006a) y Strader et al. (2006) para M49, M60 y M87, todos alrededor de $d(g' - z')/dz' \sim -0.040$. Este valor es equivalente al obtenido para NGC 6861

cuando se emplea la relación de Forte et al. (2013) entre los colores $(g' - z')$ y $(g' - i')$ obtenidos en base a observaciones de la *Advanced Camera for Surveys*. De manera similar a la realizada para los CGs azules, se realizaron ajustes lineales para los candidatos intermedios y rojos en el caso trimodal, obteniendo $d(g' - i')_0/di'_0 = -0.009 \pm 0.022$ y $d(g' - i')_0/di'_0 = -0.019 \pm 0.018$, respectivamente. Como puede observarse, la pendiente para los CGs intermedios no es significativa, mientras que en el caso de los CGs rojos, se obtiene un débil *red-tilt*, aunque el valor de esta pendiente tiene una significancia marginal. Cuando se ajustan en el caso bimodal los picos rojos, se obtiene $d(g' - i')_0/di'_0 = 0.012 \pm 0.009$. Sin embargo, esta pendiente marginalmente significativa desaparece cuando se descarta el punto más brillante. Por lo tanto, es probable que no exista en realidad pendiente alguna en la muestra de los CGs rojos cuando se acepta el caso bimodal.

13.2 Comparación con la emisión del gas caliente

En el estudio del sistema de CGs de la galaxia elíptica gigante NGC 1399, Forte et al. (2005) muestran que existe una similitud entre el perfil de densidad proyectado de la subpoblación azul y el perfil de brillo superficial en rayos-X de esa galaxia. Más recientemente, Forbes et al. (2012) extendieron el estudio a otras ocho galaxias elípticas gigantes, encontrando el mismo comportamiento. Excluyendo a NGC 720, las galaxias masivas y elípticas gigantes de esta muestra se encuentran ubicadas en grupos y cúmulos.

Forte et al. (2007, 2009, 2014) sugieren que los CGs rojos están asociados con la componente estelar del bulbo en galaxias de tipo temprano, mientras que los CGs azules estarían vinculados a la componente del halo. En este contexto, es natural pensar que los candidatos azules y el gas caliente pueden compartir el mismo potencial gravitatorio en equilibrio (Forbes et al., 2012). Sin embargo, es importante notar que iguales distribuciones proyectadas 2-d no necesariamente implican una similar distribución espacial 3-d. En tal contexto, resulta valioso aportar con más ejemplos bien estudiados de galaxias donde se observe este fenómeno.

Por consiguiente, se decidió buscar en la literatura estudios en rayos-X de las galaxias estudiadas en esta Tesis, para realizar una comparación entre la pendiente del perfil de densidad de los CGs azules y el correspondiente a la emisión del gas caliente. Desafortunadamente, solo existe un análisis completo de la emisión en rayos-X para la galaxia NGC 6861 y su vecina NGC 6868 presentado por Machacek et al. (2010). Para ambas galaxias, estos autores cuantifican la emisión de rayos-X mediante un perfil β doble. La componente interna podría estar asociada con la emisión de la galaxia y la parte exterior con el halo caliente del subgrupo. En este contexto, Machacek et al. sugieren que NGC 6868 y NGC 6861 serían las galaxias dominantes de dos subgrupos en proceso

de fusión. El modelo β es comúnmente utilizado para reproducir los perfiles de brillo superficial observado en rayos-X en galaxias (O’Sullivan et al., 2003), y se define como:

$$S(r) = S_0[1 + (r/r_c)^2]^{-3\beta_x+0.5} \quad (13.4)$$

Los parámetros relevantes en el modelo son el radio de *core* (r_c) y la pendiente del perfil (β_x); este último define el comportamiento del perfil de densidad para $r > r_c$. En el caso de NGC 6861, Machacek et al. obtuvieron los siguientes parámetros para el modelo β : $r_c = 0.5(11.9)$ kpc y $\beta = 0.61(0.38)$ para la componente interna (externa), respectivamente.

Con el objetivo de comparar cuantitativamente las pendientes de los perfiles de los CGs azules y en rayos-X, se realizó el conteo de los candidatos azules en anillos circulares concéntricos. La Figura 13.2 muestra el conteo mediante círculos llenos y sus correspondientes barras de error poissonianas. Mediante línea continua se grafica el modelo β doble de Jones et al. (en preparación), el cual fue desplazado verticalmente para lograr un buen ajuste. Como se observa, el perfil en rayos-X muestra un excelente acuerdo con el perfil de densidad de los cúmulos azules para $r > 50$ segundos de arco (> 10 kpc). Posteriormente, se realizó el ajuste del perfil de densidad de los CGs azules considerando los puntos en el rango $10.6 < r < 67.1$ kpc empleando un único modelo β . El valor obtenido para la pendiente resultó de $\beta \sim 0.38 - 0.44$, el cual es similar al obtenido por Machacek et al. Sin embargo, debido al acotado rango radial empleado en el ajuste, el parámetro r_c no pudo ser obtenido. Para obtener un valor más confiable de β , se volvió a ajustar los datos pero en este caso fijando el parámetro r_c al valor obtenido por Machacek et al. El nuevo valor obtenido es $\beta = 0.42 \pm 0.01$. Este ajuste se representa mediante línea de trazos en la Fig. 13.2. Nuevamente, el acuerdo es excelente mostrando que los CG azules más externos presentan una distribución proyectada similar a la componente en rayos-X del subgrupo.

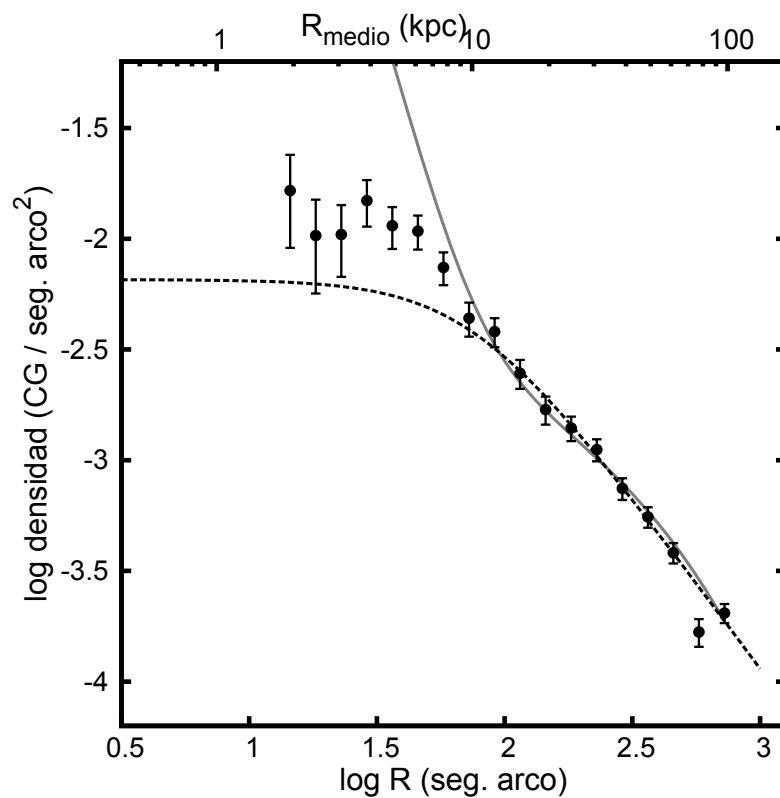


FIGURA 13.2: Perfil de densidad proyectado de la subpoblación azul (círculos negros llenos) y perfil de brillo superficial en rayos-X (línea continua) de NGC 6861. Este último fue desplazado en el eje vertical para una mejor comparación. La línea de trazos muestra el ajuste del modelo β sobre el perfil de densidad de los CGs azules.

Capítulo 14

Poblaciones estelares en NGC 4546

14.1 Introducción

La formación de los CGs está estrechamente ligada a la historia de formación estelar de las galaxias (Kissler-Patig et al. 1998; Kuntschner et al. 2002; Puzia et al. 2004, 2005; Strader et al. 2007), resultando ser objetos estelares más simples en comparación con sus galaxias anfitrionas. Las distancias a las que se ubican especialmente galaxias de tipo temprano, no permiten resolver sus estrellas y obtener estimaciones de las edades. Dado que los CGs pueden considerarse como objetos coetáneos, con metalicidades similares, los mismos se vuelven una herramienta importante para trazar y representar la componente estelar global de las galaxias. Las estimaciones de edades, metalicidades y composición química de estos objetos brindan información sobre diferentes procesos, épocas de formación y escalas de tiempo que ocurren durante la formación y evolución de las galaxias que se observan en el Universo local.

Con ciertas hipótesis de base, el estudio fotométrico permite de alguna forma evaluar edades y metalicidades de los CGs extragalácticos (Puzia et al. 1999; Maraston et al. 2001), la existencia de la degeneración edad-metalicidad en este tipo de datos, obstaculiza por un lado la interpretación de la multi-modalidad mostrada en las distribuciones de colores, así como también la reconstrucción de las historias de formación estelar. Otra alternativa, por supuesto, es utilizar una combinación de fotometría óptica e infrarroja. Sin embargo, dado que los CGs extragalácticos son objetos relativamente débiles aún para la instrumentación actual, dicha técnica ha sido aplicada solo a unos pocos casos sin resultados concluyentes (Chies-Santos et al., 2012).

La utilización de datos espectroscópicos brinda una alternativa en la determinación de las propiedades internas de los CGs. La medición de índices de Lick (Burstein et al. 1984; Worthey et al. 1994; Trager et al. 1998), en conjunto con modelos evolutivos SSP, permiten “romper” la anteriormente mencionada degeneración edad-metalicidad y obtener así estimaciones de edades, metalicidades y abundancias químicas en este tipo de objetos.

14.2 Observaciones y reducción de los datos

La espectroscopía Gemini/GMOS-S (Hook et al., 2004) utilizada en este trabajo, fue observada en el período de julio de 2013 a enero de 2014 como parte del programa Gemini GS-2013A-Q-26. El objetivo principal de este programa es investigar la conexión, si la hay, entre la enana ultra compacta NGC 4546-UCD1 (Norris & Kannappan, 2011) y el sistema de CGs de la galaxia lenticular NGC 4546. Utilizando el diagrama color-magnitud i'_0 vs $(g' - i')_0$ correspondiente a los objetos ubicados en el campo central del mosaico de NGC 4546, se seleccionaron los candidatos a CGs, la mencionada UCD, incluyendo además objetos con magnitudes $M_V < -10$ que no cumplieran con los criterios de corte en color mencionados en la Sección 7.1. Estos últimos se escogieron de manera de confirmar o descartar la presencia de alguna otra UCD presente en la vecindad de NGC 4546. En la Figura 14.1 se muestra la imagen del campo central de NGC 4546 en el filtro g' , y superpuestos los objetos escogidos para este estudio.

La espectroscopía aquí descrita comprende 12 exposiciones, utilizando un *binning* de 2×2 , con tiempo de exposición cada una de 1850 segundos, observadas con la red B1200 que produce una dispersión de 0.26 \AA/pix . Para corregir los *gaps* entre los detectores en la etapa de reducción, las imágenes se observaron en las longitudes de onda centrales de 485 nm y 487.5 nm. Los candidatos a CGs fueron observados a través de una ranura de 1.5 segundos de arco de ancho, mientras que sobre la UCD se utilizó una ranura de 0.5 segundos de arco de ancho. Dicha configuración cubre un rango espectral aproximado entre 400 a 580 nm. Se obtuvieron cuatro exposiciones adicionales pero las mismas no se utilizaron en este análisis debido a que el instrumento se encontraba significativamente fuera de foco, por lo que la resolución espectral no era la deseada. La resolución media obtenida en la ranura de $1.5''$ para las 12 exposiciones fue de 2.8 \AA , empleando para tal medición líneas aisladas en los espectros de calibración y la línea de cielo 5197 \AA , la cual era visible en 11 de las 12 exposiciones de ciencia. En el caso de la UCD se obtuvo una resolución media de 1.41 \AA . El *seeing* de las exposiciones individuales varió de $0.5''$ a $0.9''$ con un valor medio de $\sim 0.7''$. Junto con el programa de ciencia también se observaron imágenes *flat-field* y espectros de lámpara cobre argón necesarios para el proceso de reducción de los datos, y los cuales forman parte de las *baseline calibrations*

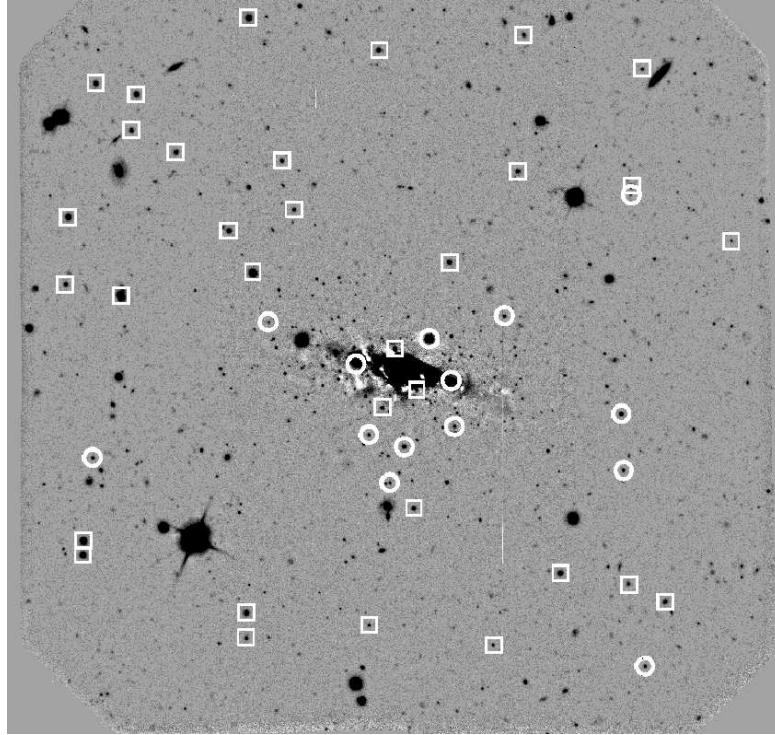


FIGURA 14.1: Imagen en la banda g' de NGC 4546. El brillo de la galaxia se sustrajo para una mejor visualización de los objetos. Los círculos y cuadrados blancos muestran la posición de los objetos que posteriormente fueron confirmados como CGs y objetos de fondo, respectivamente.

tomadas por el observatorio. Además, se incluyó en modo ranura larga, la observación de una estrella estándar (EG131) con sus respectivos flats y lámpara de calibración.

La reducción de la espectroscopía GMOS, la cual se detallará a continuación, fue inicialmente similar a la que se describe en Bridges et al. (2006) y Norris et al. (2008). Para ello, se utilizó inicialmente el paquete GEMINI de IRAF (versión V2.15), y posteriormente comandos y rutinas del software IDL (versión 7.1).

Se utilizaron los siguientes lineamientos para el proceso de reducción y calibración de los datos:

- se buscaron imágenes bias en el GSA comprendidas en el período de observación de los datos de ciencia, luego combinándose para crear un bias maestro que es aplicado a todas las observaciones. La construcción de este bias maestro (combinación de ~ 80 imágenes) se realizó empleando la tarea GBIAS.
- Los flats asociados a cada conjunto de observación se normalizaron utilizando la tarea GSFLAT, dado que generalmente este tipo de datos posee variaciones grandes en la iluminación en función de la longitud de onda.
- Sobre estos flats normalizados, se utilizó la tarea GSCUT para obtener los límites entre las diferentes ranuras asociadas a cada objeto observado.

- Se aplicó la tarea GSREDUCE sobre los datos de ciencia, llevando a cabo la sustracción de *overscan*, la sustracción de bias y la corrección por *flat-fields*, utilizando para ello el bias maestro y los flats mencionados anteriormente.
- Por su parte, los espectros de lámpara se redujeron en forma separada, aplicando nuevamente GSREDUCE, pero solo corrigiendo este caso por bias. Esta tarea obtiene una primera aproximación en la calibración de longitud de onda utilizando información del *header* de la imagen.
- Posteriormente, se utiliza la tarea GSWAVELENGTH sobre las imágenes de lámpara para establecer una calibración de longitud de onda precisa. Esta etapa de la reducción resulta de suma importancia dado que se requiere una mayor interacción por parte del usuario.
- Las imágenes de ciencia se limpian de rayos cósmicos, utilizando la tarea GSCR-SPEC la cual ha sido modificada para trabajar conjuntamente con la rutina *Laplacian Cosmic Ray Identification*¹. La misma brinda una mejor limpieza sobre las imágenes en comparación con la tarea GSCRREJ, disponible dentro del paquete de reducción Gemini/GMOS.
- Para controlar que la solución obtenida en longitud de onda sea la correcta, se aplica la tarea GSTRANSFORM sobre las mismas imágenes de lámpara reducidas. Si la misma resulta aceptable, entonces la solución obtenida por GSWAVELENGTH es aplicada sobre la imagen de ciencia que corresponde con dicha lámpara, empleando nuevamente GSTRANSFORM. De esta manera, todas las imágenes de ciencia resultan calibradas en longitud de onda.
- Luego, la extracción de los espectros unidimensionales correspondientes a cada objeto observado en las 12 imágenes ($12 \times 46 = 552$ espectros), se realizó mediante la tarea APALL, excepto en los datos asociados a la UCD, para los cuales se utilizó un procedimiento alternativo. En este paso, es necesario considerar diferentes parámetros en dicha tarea para realizar la mejor extracción de los espectros (Massey et al., 1992).
- Previo a la combinación de los 12 espectros correspondientes a cada objeto, los mismos se corrigieron al sistema heliocéntrico (utilizando la tarea DOPCOR de IRAF), lo cual resulta extremadamente importante, ya que la velocidad radial varía en $\pm 30 \text{ km s}^{-1}$ por dicha corrección en este conjunto de datos. La combinación de estos espectros corregidos se realizó utilizando la tarea SCOMBINE, empleando la mediana para la combinación y la opción “sigclip” para el rechazo de píxeles malos. A modo de ejemplo, en la Figura 14.2 se muestran tres espectros de CGs confirmados de NGC 4546, junto con la ubicación de diferentes líneas de absorción.

¹ver <http://www.astro.yale.edu/dokkum/lacosmic/>

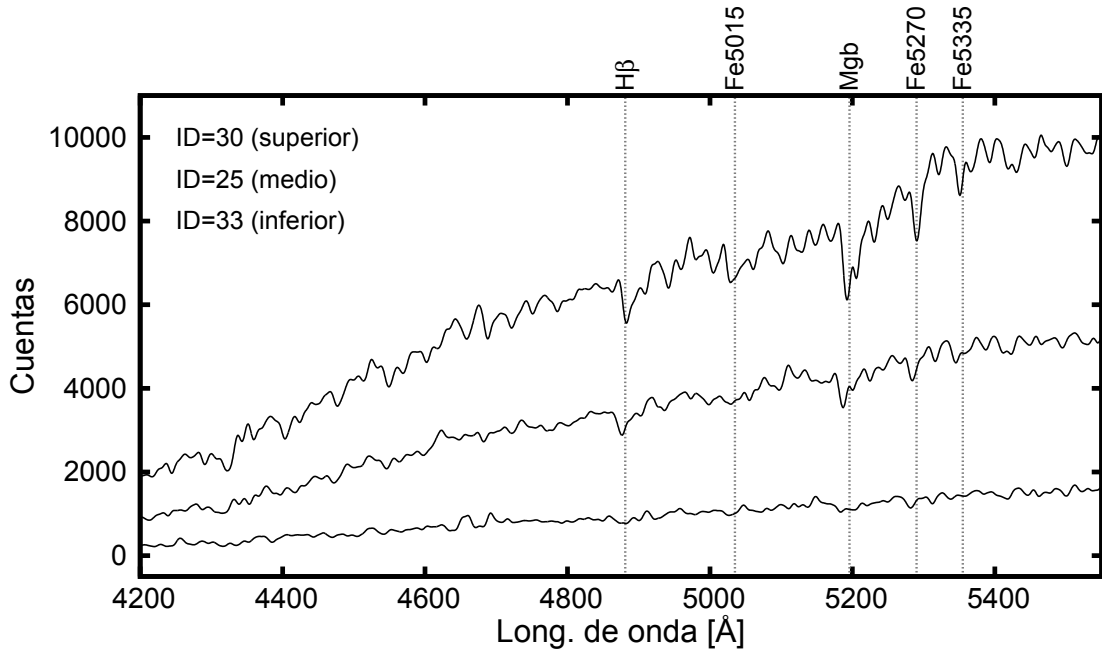


FIGURA 14.2: Espectros obtenidos luego de la combinación de 12 exposiciones individuales correspondientes a tres CGs confirmados de NGC 4546 (ver Tabla 14.1). Los mismos fueron convolucionados con un kernel gaussiano para llevarlos a la resolución de Lick/IDS (ver Sección 14.4). Las líneas punteadas verticales indican la ubicación de diferentes líneas de absorción utilizadas para el análisis de población estelar.

Como se mencionó anteriormente, la extracción y combinación de los espectros 2D correspondientes a la observación de la UCD, se realizó utilizando un *script* conformado por comandos y rutinas del software IDL. El mismo rectifica espacialmente cada uno de los espectros 2D trazando el pico de la distribución de la luz, dado que aún pueden existir efectos debido a la distorsión instrumental. Este problema ocurre normalmente hacia el extremo azul del espectro. Dicha corrección en todos los espectros resultó menor a 3 píxeles. Luego, el mismo *script* corrige las velocidades al sistema heliocéntrico, y por último estima y resta el cielo de las exposiciones individuales de ciencia y combina los mismos (se utiliza en este caso un algoritmo de rechazo para píxeles y columnas malas).

La utilización de este procedimiento en los espectros de la UCD se realizó debido a que con la configuración instrumental utilizada se deseaba obtener información de la cinemática interna de la misma. Esto, como se sabe, requiere un tratamiento cuidadoso debido a que para un objeto de las características de los UCDs, nos encontramos al límite de lo detectable con dicha configuración. En el caso de los CGs, la cinemática interna queda fuera del alcance de nuestros datos, por lo cual este procedimiento no es necesario.

Los espectros integrados obtenidos para los objetos seleccionados tienen una relación señal ruido (S/N medido a 5000 Å) que va desde 6 por Å hasta un valor de 160 por Å para el caso de la UCD. Debido al brillo relativo de la UCD en comparación

con los CGs (la UCD es ~ 3 mag más brillante), la S/N del espectro integrado de este objeto es excelente.

- Finalmente, es necesario calibrar en flujo los 47 espectros uni-dimensionales ya combinados. Esto se realizó empleando las exposiciones de la estrella estándar EG131 (Bessell 1999; 3 exposiciones centradas en 445, 485 y 525 nm), la cual se obtuvo como parte del programa de ciencia mencionado anteriormente, usando la misma configuración de observación que los datos de ciencia, excepto que fue observada a través de una ranura larga de $0.5''$ de ancho. La reducción de los datos de la estrella estándar siguió el mismo procedimiento que los datos de ciencia. Una vez reducidos estos datos, se restó luego el nivel de cielo en cada exposición (tarea GSSKYSUB de IRAF) y se extrajo cada espectro mediante la tarea APALL. El siguiente paso fue obtener la función de sensibilidad del detector utilizando la tarea GSSTANDARD, la cual se emplea para calibrar el espectro de la estrella estándar. Por último, los espectros de ciencia son calibrados en flujo mediante la tarea CALIBRATE de IRAF, utilizando la función de sensibilidad obtenida anteriormente.

14.3 Cinemática

La determinación de la velocidad radial de los candidatos a CGs se realizó empleando la tarea FXCOR en el paquete RV de IRAF. Esta tarea utiliza el método de correlación cruzada de Fourier (Tonry & Davis, 1979), para comparar los espectros de ciencia cuyas velocidades radiales y dispersiones de velocidades son desconocidas, con espectros *templates* con dichos parámetros conocidos. Usualmente, este tipo de espectros patrón corresponden a estrellas. Sin embargo, dado que no se contaba con una muestra de espectros estelares observados con GMOS, en esta Tesis se utilizaron como *templates* los modelos de SSP de Maraston & Strömbäck (2011). En particular, se utilizaron los modelos SSP-ELODIE (~ 120 espectros) por tener una alta resolución (0.55 \AA FWHM). Los mismos cubren el rango de edad de 0.01×10^9 a 15×10^9 años con metalicidades $[\text{Fe}/\text{H}]$ de -1.5 a $+0.5$. Las velocidades finales de los candidatos a CGs se estimaron considerando un promedio en los valores (dentro de 3σ) derivadas del ajuste de todos los *templates*. Por su parte, los errores en las velocidades se estimaron a partir de la media de los errores medidos por FXCOR. Es necesario recordar que la resolución media obtenida para las ranuras de $1.5''$ fue de 2.8 \AA , con lo cual, de acuerdo a la configuración instrumental mencionada en la Sección 14.2, no fue posible determinar las dispersiones de velocidades de los objetos en estudio.

Los objetos con velocidades cercanas al valor estimado para NGC 4546 ($V_{\text{sis}} = 1051 \pm 5 \text{ km s}^{-1}$, NED) se aceptan como CGs pertenecientes a dicha galaxia. En este caso, 14 (13 CGs y la UCD) de los 47 objetos observados poseen velocidades cercanas a la galaxia,

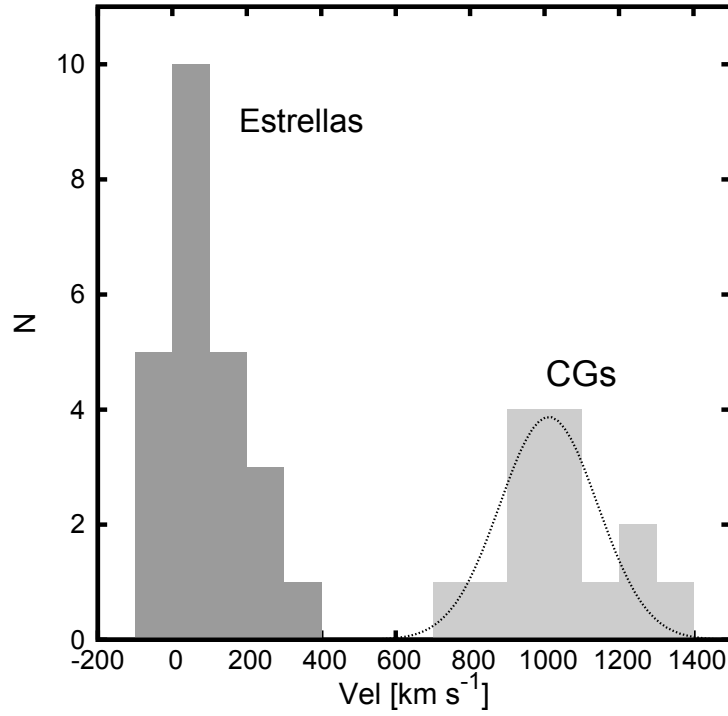


FIGURA 14.3: Histograma de velocidades de los objetos medidos en NGC 4546. La línea negra punteada representa el ajuste gaussiano a la población de CGs de dicha galaxia.

ID	RA	Dec	$(g' - z')_0$	r'_0	Vel	S/N
(1)	(grados) (2)	(grados) (3)	(mag) (4)	(mag) (5)	(km s ⁻¹) (6)	(por Å) (7)
7	188.8190888	-3.8388804	0.85	21.49	1038 ± 9	17
16	188.8421545	-3.8388432	1.40	22.02	947 ± 5	11
17(UCD)	188.8602269	-3.8390304	1.34	17.30	1225 ± 0.3	160
23	188.8492191	-3.8388804	1.00	21.19	1017 ± 8	18
24	188.8508298	-3.8389133	1.32	20.24	916 ± 4	43
25	188.8466751	-3.8389070	1.26	20.46	972 ± 4	33
26	188.8631176	-3.8388782	1.12	21.09	1002 ± 4	20
27	188.8549880	-3.8389132	1.35	20.16	823 ± 5	26
28	188.8452865	-3.8388804	0.93	21.22	1073 ± 9	17
30	188.8570475	-3.8389235	1.42	19.89	1308 ± 2	37
32	188.8436975	-3.8388698	0.93	21.54	978 ± 7	16
33	188.8481874	-3.8388583	1.21	21.61	766 ± 9	11
34	188.8623315	-3.8388314	1.42	22.14	1279 ± 17	6
40	188.8783442	-3.8388389	0.87	22.04	1156 ± 23	10

TABLA 14.1: Parámetros espectro-fotométricos obtenidos para los CGs/UCD confirmados en NGC 4546. Columnas: (1) identificador de los CGs/UCD. (2)-(3) ascensión recta y declinación en la época J2000. (4) color $(g' - z')_0$. (5) magnitud en la banda r'_0 . (6) velocidad heliocéntrica. (7) señal-ruido por Å medida en 5000 Å.

mientras que el resto se corresponden con estrellas de la Vía Láctea y galaxias de fondo. La columna (6) de la Tabla 14.1 muestra los valores obtenidos para cada objeto. En la Figura 14.3 se observa la distribución de velocidad radial de los objetos, con el ajuste obtenido al considerar una función gaussiana ($\mu = 1011 \text{ km s}^{-1}$ y $\sigma = 131 \text{ km s}^{-1}$). Nuevamente, es necesario mencionar que la elección de objetos brillantes en el campo

de NGC 4546 se realizó para explorar la presencia de alguna otra UCD en el sistema de la galaxia.

Para el espectro de la UCD, se utilizó también el código *Penalized pixel fitting* (pPXF, por sus siglas en inglés; Cappellari & Emsellem 2004) para obtener la cinemática de este objeto. Este método fue escogido ya que permite medir simultáneamente la velocidad radial y la dispersión de velocidades a partir de su espectro. El mismo se aplicó sobre el rango de longitud de onda de 4120 a 5530 Å, intentando ajustar los cuatro momentos de la distribución de velocidades a lo largo de la línea de la visual (vel , σ , h_3 , h_4). Sin embargo, los momentos de orden superior (h_3, h_4) fueron consistentes con cero, de modo que se ejecutó nuevamente dicho código ajustando únicamente los dos primeros momentos. Las incertezas en las mediciones se obtuvieron realizando 100 simulaciones de Monte Carlo añadiendo ruido a los datos de entrada. Los valores obtenidos se listan en la Tabla 14.1 (columna (6)). La Figura 14.4 muestra el excelente ajuste obtenido por pPXF con los modelos utilizados sobre el espectro de la UCD.

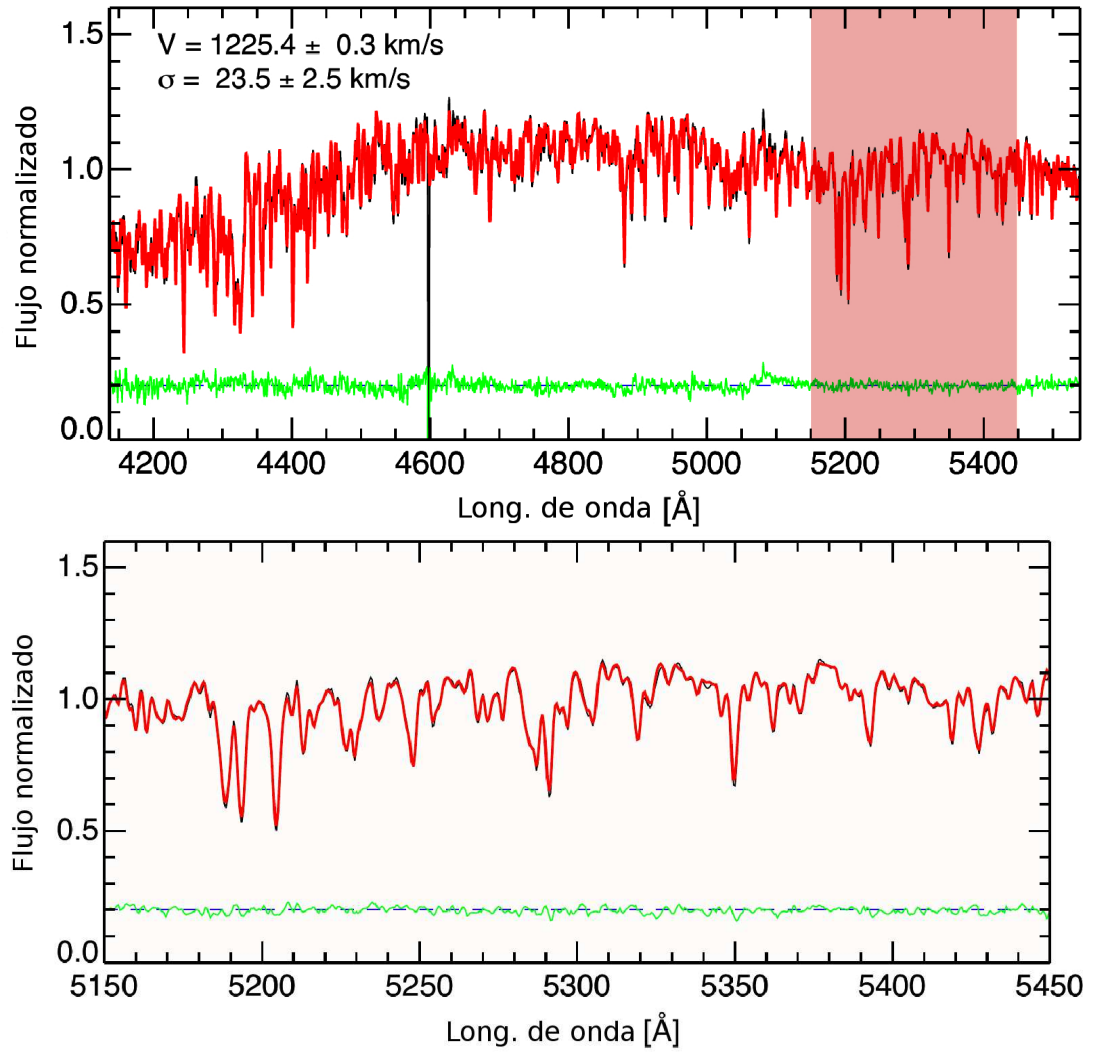


FIGURA 14.4: Panel superior: espectro integrado de la NGC 4546-UCD. Las líneas negra y roja representan el espectro y el ajuste obtenido por pPXF mediante los modelos de Maraston & Strömbäck (2011), respectivamente. La línea verde muestra los residuos obtenidos del ajuste (la misma se desplazó hacia el valor 0.2 para una mejor visualización). Los efectos producidos por el enmascaramiento de los *gaps* durante el ajuste se aprecian en los residuos en ~ 4600 Å y 5080 Å. La región sombreada indica la región presentada en el panel inferior. Panel inferior: región ampliada entre 5150 y 5450 Å para demostrar la alta calidad del ajuste.

14.4 Índices de Lick

El sistema espectroscópico de índices de Lick/IDS (Burstein et al. 1984; Worthey et al. 1994; Worthey & Ottaviani 1997; Trager et al. 1998), se basa en un conjunto de líneas de absorción escogidas por ser en su mayoría sensibles a la edad (por ejemplo, $H\gamma$, $H\delta$ y $H\beta$), a la abundancia de hierro (por ejemplo Fe 5270, Fe 5335) o elementos α tales como el magnesio (por ejemplo Mg b). El sistema comprende 25 índices entre líneas de absorción atómicas y moleculares, cubriendo un rango en longitud de onda de ~ 4040 a ~ 6420 Å. Ideado para estudiar espectroscópicamente galaxias masivas de tipo temprano con altas dispersiones de velocidad, los índices espectrales se definieron para una baja resolución espectral ($R \leq 700$), y fueron observados con un instrumento que presentaba una resolución espectral que variaba con la longitud de onda, desde 8 a 11 Å. Además, los espectros originales de Lick/IDS no fueron calibrados en flujo utilizando estándares espectroscópicos, sino que se normalizaron mediante una lámpara de calibración. Esto último se corrigió en nuestros datos mediante los valores listados en el trabajo de Loubser et al. (2009). Debido a los motivos antes mencionados, los espectros utilizados en esta Tesis, obtenidos a través del instrumento GMOS-S, se convolucionaron con un kernel gaussiano para reproducir la resolución del sistema de Lick/IDS. Esto debe hacerse antes de realizar cualquier medición de los mismos.

La medición de las líneas de absorción utilizando las definiciones de Lick (Tabla 14.2), requiere definir tres anchos de bandas para cada índice. Las mismas comprenden la región donde se encuentra la línea a medir, y dos pseudo-continuo adyacentes a la misma, estos últimos definidos de manera de evitar cualquier línea intensa o variable. El cociente de flujo entre la línea a medir (F_l) y el pseudo-continuo (F_c) se utiliza para definir el índice de una línea. En el caso de líneas de absorción atómicas, se emplea la expresión:

$$I_a = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left(1 - \frac{F_l(\lambda)}{F_c(\lambda)} \right) d\lambda \quad (14.1)$$

en unidades de Å, donde λ_{\min} y λ_{\max} definen los límites azul y rojo de la línea. Mientras para el caso de líneas moleculares, se utiliza la expresión:

$$I_m = -2.5 \log \left[\frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{F_l(\lambda)}{F_c(\lambda)} d\lambda \right] \quad (14.2)$$

en unidades de magnitudes, siendo $\Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min}$.

A partir de las definiciones que figuran en la Tabla 14.2, la intensidad de los índices en los espectros de los CGs de NGC 4546, se midieron empleando un *script* IDL facilitado por el Dr. Mark Norris a través de una colaboración con el director de esta Tesis.

Indices	rango espectral		continuo azul		continuo rojo		unidades
H δ_A	4083.500	4122.250	4041.600	4079.750	4128.500	4161.000	Å
H δ_F	4091.000	4112.250	4057.250	4088.500	4114.750	4137.250	Å
CN ₁	4143.375	4178.375	4081.375	4118.875	4245.375	4285.375	mag
CN ₂	4143.375	4178.375	4085.125	4097.625	4245.375	4285.375	mag
Ca4227	4223.500	4236.000	4212.250	4221.000	4242.250	4252.250	Å
G4300	4282.625	4317.625	4267.625	4283.875	4320.125	4336.375	Å
H γ_A	4319.750	4363.500	4283.500	4319.750	4367.250	4419.750	Å
H γ_F	4331.250	4352.250	4283.500	4319.750	4354.750	4384.750	Å
Fe4383	4370.375	4421.625	4360.375	4371.625	4444.125	4456.625	Å
Ca4455	4453.375	4475.875	4447.125	4455.875	4478.375	4493.375	Å
Fe4531	4515.500	4560.500	4505.500	4515.500	4561.750	4580.500	Å
Fe4668	4635.250	4721.500	4612.750	4631.500	4744.000	4757.750	Å
H β	4847.875	4876.625	4827.875	4847.875	4876.625	4891.625	Å
Fe5015	4977.750	5054.000	4946.500	4977.750	5054.000	5065.250	Å
Mg ₁	5069.125	5134.125	4895.125	4957.625	5301.125	5366.125	mag
Mg ₂	5154.125	5196.625	4895.125	4957.625	5301.125	5366.125	mag
Mgb	5160.125	5192.625	5142.625	5161.375	5191.375	5206.375	Å
Fe5270	5245.650	5285.650	5233.150	5248.150	5285.650	5318.150	Å
Fe5335	5312.125	5352.125	5304.625	5315.875	5353.375	5363.375	Å
Fe5406	5387.500	5415.000	5376.250	5387.500	5415.000	5425.000	Å
Fe5709	5698.375	5722.125	5674.625	5698.375	5724.625	5738.375	Å
Fe5782	5778.375	5798.375	5767.125	5777.125	5799.625	5813.375	Å
NaD	5878.625	5911.125	5862.375	5877.375	5923.875	5949.875	Å
TiO ₁	5938.375	5995.875	5818.375	5850.875	6040.375	6105.375	mag
TiO ₂	6191.375	6273.875	6068.375	6143.375	6374.375	6416.875	mag

TABLA 14.2: Definición de los 25 índices de Lick expuestos en los trabajos de Worthey (1994) y Worthey & Ottaviani (1997).

14.5 Poblaciones estelares

El análisis de la distribución de color del sistema de CGs de NGC 4546 (Capítulo 8), muestra la presencia al menos de tres subpoblaciones diferentes de CGs. La Figura 14.5 presenta el diagrama color-magnitud para todos los candidatos a CGs detectados en los tres campos GMOS, señalando los CGs/UCD confirmados espectroscópicamente. En dicha figura se muestran con rombos llenos y cuadrados grises aquellos objetos con $S/N > 20$ y $S/N < 20$, respectivamente. De acuerdo a la separación en color realizada en el Capítulo 9 para las distintas subpoblaciones, 5 CGs pertenecerían a la subpoblación azul, 2 a la intermedia y 7 a la roja. A partir de las mediciones de los índices de Lick para los mismos, se construyeron los diagramas de diagnósticos H β vs. [Mg Fe] y $\langle \text{Fe} \rangle$ vs. Mgb (Figura 14.6) donde $[\text{Mg Fe}] = \sqrt{\text{Mgb} (0.72 \cdot \text{Fe } 5270 + 0.28 \cdot \text{Fe } 5335)}$ (Thomas et al., 2003) y $\langle \text{Fe} \rangle = [(\text{Fe } 5270 + \text{Fe } 5335)/2]$ (González, 1993). En los mismos se superpusieron los modelos de Thomas et al. (2003, 2004) para abundancias de elementos α de $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0, 0.3$ y 0.5 con edades entre $1 - 12 \times 10^9$ años y metalicidades de -2.25 a $+0.67$. La elección de estos índices, sensibles a la edad y metalicidad, son utilizados comúnmente para delimitar la metalicidad y abundancia de elementos α (Kuntschner et al., 2002). Dada la baja S/N que presentaban algunos espectros, no se pudieron determinar valores confiables en algunos índices de Lick en 8 CGs, es por ello que en los diagramas de diagnóstico, se incluyeron aquellos objetos con $S/N > 20$ (rombos llenos y círculos llenos en Figura 14.5 y 14.6, respectivamente), a fin de obtener una mejor visualización

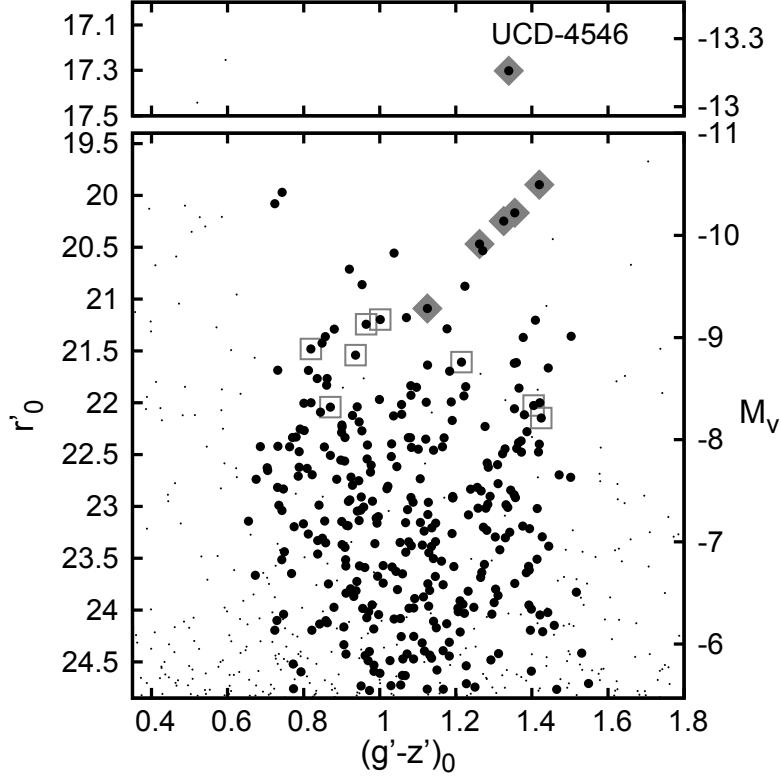


FIGURA 14.5: Diagrama color-magnitud de los candidatos a CGs en NGC 4546 (círculos negros llenos). Los cuadrados y rombos llenos grises indican los CGs/UCD confirmados espectroscópicamente que poseen $S/N < 20$ y $S/N > 20$ por \AA , respectivamente.

de los modelos y de dichos objetos. Como se observa en el panel izquierdo de la Figura 14.6, la mayoría de los CGs se ubican sobre el valor $[\alpha/\text{Fe}] = 0.3$, por lo que dicho valor se escogió para construir el diagrama de diagnóstico $\text{H}\beta$ vs. $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ (panel derecho en Fig. 14.6). Allí se observa que tres objetos (2 CGs y la UCD) se encuentran sobre las líneas de edades correspondientes a objetos jóvenes y/o de edad intermedia. Sin embargo, debemos señalar que el error mostrado por los índices en uno de ellos resulta significativo. El resto de los CGs poseen edades consistentes con objetos antiguos ($\sim 12 \times 10^9$ años).

Con el objetivo de determinar las edades, metalicidades y abundancias de elementos α de todos los objetos medidos (13 CGs y la UCD), se utilizó el método de ajuste de Proctor & Sansom (2002) y Proctor et al. (2004). Dicho método estima los parámetros antes mencionados, mediante un ajuste χ^2 de los valores de varios índices de Lick/IDS observados, con aquellos provenientes de modelos SSP (Thomas et al. 2003, 2004). En este trabajo, se utilizaron los índices $\text{H}\beta$, Fe 5015, Mgb, Fe 5270 y Fe 5335, dado que los mismos brindan resultados aceptables para el estudio de CGs extragalácticos (Norris et al., 2006).

En la Tabla 14.3 se listan los valores de edad, metalicidad y abundancia obtenidos para cada objeto, representándose los mismos en la Figura 14.7. Se observa en la misma que

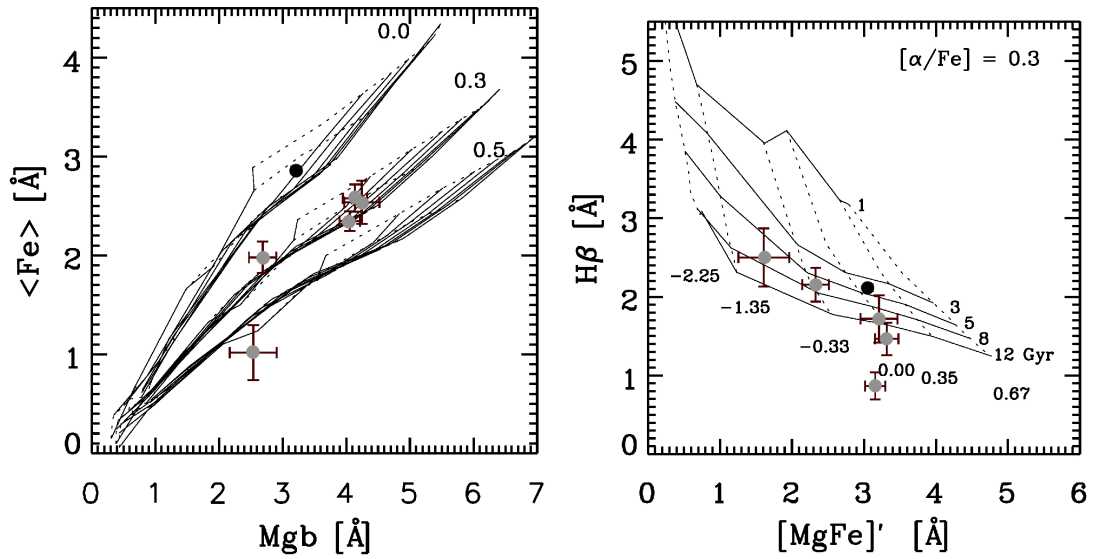


FIGURA 14.6: Diagramas de diagnóstico sobre los cuales se superponen los modelos de Thomas et al. (2003, 2004) con metalicidades $[Z/H] = -2.25, -1.35, -0.33, 0.0, +0.35, +0.57$, edades de $(3 - 12) \times 10^9$ años, y abundancias $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0, 0.3, 0.5$ (panel izquierdo), y el valor fijo $[\alpha/\text{Fe}] = 0.3$ (panel derecho). Los círculos grises y el círculo negro representan los CGs y la UCD, respectivamente, cuyos espectros tienen $S/N > 20$ por Å.

los CGs poseen metalicidades de -1.5 a $+0.5$ con un amplio rango en $[\alpha/\text{Fe}]$. Nuevamente, al igual que lo visto en la Fig. 14.6, la mayoría de los CGs poseen edades consistentes con objetos antiguos, excepto al menos un CG ($S/N > 20$), el cual tiene una edad intermedia de 5×10^9 años (además de otros objetos, cuya $S/N < 20$). En el panel izquierdo de la Figura 14.8 se observa que dicho objeto posee color $(g' - z')_0$ correspondiente al rango entre la subpoblación intermedia y roja. En el caso de la UCD, se presenta un análisis más detallado en la Sección 14.6. En contraste, Kuntschner et al. (2010) obtuvieron que el mejor modelo SSP que ajusta la luz difusa de NGC 4546 brinda una edad de $11.7^{+1.1}_{-1.0} \times 10^9$ años. Con lo cual el proceso que dio origen a la “joven” UCD, podría ser el responsable de la tercera subpoblación de CGs detectados en NGC 4546.

Finalmente, en el panel derecho la Fig. 14.8 se muestra el diagrama color-metalicidad de los objetos antes mencionados, junto con las relaciones empíricas obtenidas por Faifer et al. (2011) y Usher et al. (2012). Las mismas se encuentran en buen acuerdo dentro de los errores con aquellos objetos de $S/N > 20$.

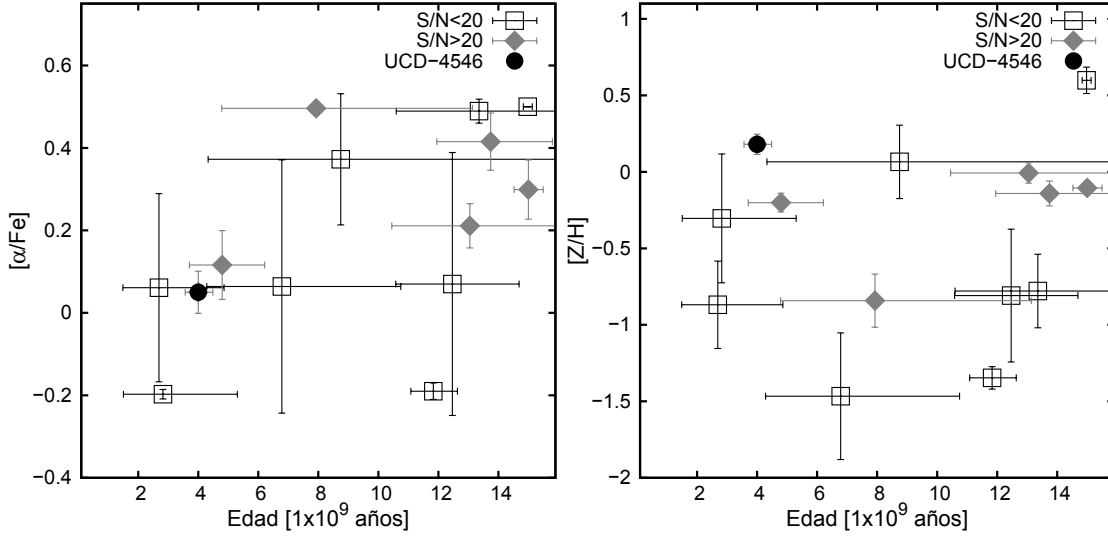


FIGURA 14.7: Diagramas $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. edad y $[Z/H]$ vs. edad para los trece CGs confirmados (cuadrados vacíos: $S/N < 20$ y rombos llenos grises: $S/N > 20$ por Å) y la UCD (círculo negro) pertenecientes al sistema de NGC 4546.

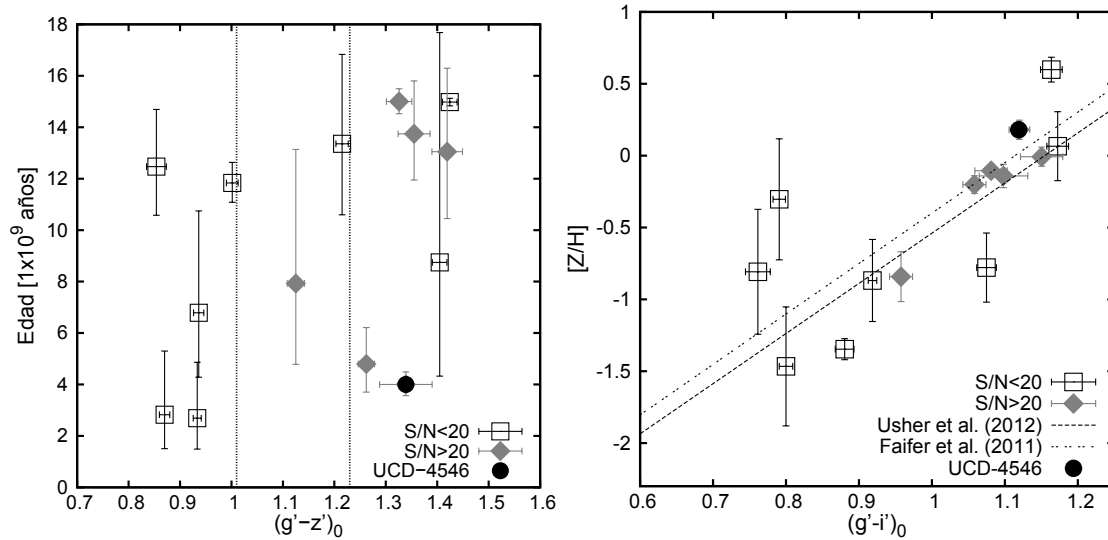


FIGURA 14.8: Diagramas edad- $(g' - z')_0$ y $[Z/H]$ - $(g' - i')_0$ para los CGs/UCD confirmados. Las líneas verticales en el panel izquierdo representan los límites en color considerados para separar las diferentes subpoblaciones de CGs (ver Capítulo 9). Las líneas punteada y de trazos en el panel derecho, muestran las relaciones color-metalicidad obtenidas por Faifer et al. (2011) y Usher et al. (2012), respectivamente.

ID	$(g' - z')_0$	Edad	[Z/H]	$[\alpha/\text{Fe}]$
(1)	(mag)	($\times 10^9$ años)	(dex)	(dex)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
7	0.85	$12.4^{+1.8}_{-2.2}$	-0.80 ± 0.43	0.07 ± 0.32
16	1.40	$8.7^{+4.4}_{-8.9}$	0.06 ± 0.24	0.37 ± 0.16
17(UCD)	1.34	$3.9^{+0.4}_{-0.4}$	0.18 ± 0.06	0.05 ± 0.05
23	1.00	$11.8^{+0.7}_{-0.8}$	-1.34 ± 0.07	-0.19 ± 0.02
24	1.32	$15.0^{+0.4}_{-0.4}$	-0.10 ± 0.04	0.30 ± 0.07
25	1.26	$4.8^{+1.0}_{-1.4}$	-0.20 ± 0.06	0.11 ± 0.08
26	1.12	$7.9^{+3.1}_{-5.2}$	-0.84 ± 0.17	0.49 ± 0.01
27	1.35	$13.7^{+1.8}_{-2.0}$	-0.14 ± 0.08	0.41 ± 0.07
28	0.93	$2.7^{+1.2}_{-2.7}$	-0.87 ± 0.28	0.06 ± 0.22
30	1.42	$13.0^{+2.6}_{-3.2}$	-0.01 ± 0.06	0.21 ± 0.05
32	0.93	$6.8^{+2.5}_{-3.9}$	-1.46 ± 0.41	0.06 ± 0.30
33	1.21	$13.3^{+2.7}_{-3.4}$	-0.78 ± 0.24	0.49 ± 0.03
34	1.42	$14.9^{+0.1}_{-0.1}$	0.59 ± 0.08	0.50 ± 0.00
40	0.87	$2.8^{+1.3}_{-2.4}$	-0.30 ± 0.42	-0.19 ± 0.01

TABLA 14.3: Parámetros de poblaciones estelares obtenidos para los CGs/UCD confirmados en NGC 4546, a partir del método de minimización χ^2 . Columnas: (1) identificador de los CGs/UCD. (2) color $(g' - z')_0$; (3) edad; (4) metalicidad; (5) abundancia de elementos α .

14.6 Historia de formación estelar de NGC 4546-UCD1

Debido a que el espectro integrado de NGC 4546-UCD1 que se obtuvo posee una alta calidad (S/N de 50 a 200), se intentó determinar la historia de formación estelar de la misma. Para ello, se utilizó un enfoque similar al descrito en McDermid et al. (2015). Se utilizó nuevamente el código pPXF para obtener la cinemática de la UCD, haciendo uso en este caso de la función de regularización para ajustar una combinación lineal de modelos de SSP en el espectro de la UCD. Desafortunadamente, debido a la alta metalicidad (pesado por luminosidad) de NGC 4546-UCD1 obtenida mediante el análisis de los índices de Lick, no se pudieron utilizar los modelos de alta resolución de Maraston & Strömbäck (2011) empleados en el análisis cinemático, ya que éstos sólo se extienden a $[Z/H] = 0.3$ dex. Hacerlo llevaría el proceso a soluciones de compromiso dado que se ejecutan en el borde del espacio de parámetros disponible. Del mismo modo tampoco pudieron utilizarse los modelos MIUSCAT SSP de Vazdekis et al. (2012), que se han utilizado con éxito para determinar las historias de formación estelar de galaxias de tipo temprano por otros autores (por ejemplo McDermid et al. 2015), ya que nuevamente no se extienden a altas metalicidades (el máximo es $[Z/H] = 0.22$ dex). Por lo tanto, se utilizaron los nuevos modelos MILES de Vazdekis et al. (2015), los cuales se extienden a $[Z/H] = 0.4$ dex (para las isócronas BaSTI), y permiten escoger una dada función inicial de masa (IMF, por sus siglas en inglés) así como una abundancia- α determinada. Se adoptó una IMF de Kroupa (véase Vazdekis et al. (2015) para mayor detalle), aceptando una abundancia- α solar de acuerdo al valor obtenido previamente de $[\alpha/\text{Fe}]$ para la UCD. Los modelos elegidos abarcan un rango en edad de 0.03×10^9 a 14×10^9 años, y $[Z/H]$ a partir de -2.27 a 0.4 dex, proporcionando un total de 636 modelos. Como la resolución

de los modelos MILES es inferior a los espectros de GMOS (FWHM=2.51 Å vs. 1.41 Å) fue necesario degradar los espectros de GMOS con el fin que coincidan con la baja resolución de los *templates*.

La receta de regularización utilizada por pPXF está diseñada para reducir las degeneraciones presentes al ajustar las historias de formación estelar a los espectros integrados de sistemas estelares complejos. Impone la condición de que los modelos adyacentes en la grilla deben tener pesos que varían suavemente, con el resultado que el ajuste de la historia de formación estelar es la solución más suave consistente con el ruido. Como los modelos SSP utilizados aquí se encuentran normalizados a una masa inicial de 1 masa solar, la distribución de pesos de pPXF recupera la contribución de cada modelo SSP a la distribución de la masa de edad cero, que es equivalente a la historia de formación estelar de la población.

La Figura 14.9 muestra las historias de formación estelar resultantes obtenidas utilizando este procedimiento. A modo comparativo, se realizó el mismo procedimiento para la UCD presente en el sistema de CGs de NGC 3923 (Norris et al., 2012). El espectro de NGC 3923-UCD1 se obtuvo con el instrumento GMOS utilizando exactamente la misma configuración que el espectro de NGC 4546-UCD1. El análisis de edad y metalicidad pesado por luminosidad de NGC 3923-UCD1 (Janz et al., 2015) brinda un valor de edad de $10.05^{+2.28}_{-1.87} \times 10^9$ años con una metalicidad de $[Z/H] = -0.29 \pm 0.06$, y $[\alpha/Fe] = 0.24 \pm 0.04$, lo que significa que este objeto tiene propiedades completamente consistentes con un CG típico.

Los cuadrados blancos y negros en la Figura 14.9 muestran la edad y metalicidad pesada por luminosidad de las UCDs mediante el método de ajuste de todo el espectro (edad= 3.13×10^9 años y $[Z/H] = 0.09$ dex de NGC 4546-UCD1, y edad= 9.91×10^9 años y $[Z/H] = -0.41$ dex de NGC 3923-UCD1). Por su parte, los círculos indican las poblaciones pesadas por luminosidad obtenido de las mediciones de los índices (edad= 3.99×10^9 años y $[Z/H] = 0.18$ dex de NGC 4546-UCD1, y edad= 10.05×10^9 años y $[Z/H] = -0.29$ dex de NGC 3923-UCD1). El hecho que ambos métodos proporcionen resultados consistentes resulta en una confirmación adicional de la confiabilidad del método de ajuste del espectro completo.

A partir de la Figura 14.9, resulta claro que NGC 4546-UCD1 parece haber tenido una historia de formación estelar muy extendida, con estrellas en formación desde épocas tempranas hasta alrededor de 1×10^9 años (insinuado fuertemente por la edad joven pesada por luminosidad de la UCD). Por otro lado, la evolución de la metalicidad indicada en dicha figura resulta particularmente interesante, ya que en épocas tempranas la metalicidad de este objeto era elevada, con valores cercanos a la solar. Esta metalicidad inicial alta implica que el mismo se ha formado en un medio ya altamente enriquecido, implicando a su vez que el objeto debió estar situado en el centro de un halo bastante

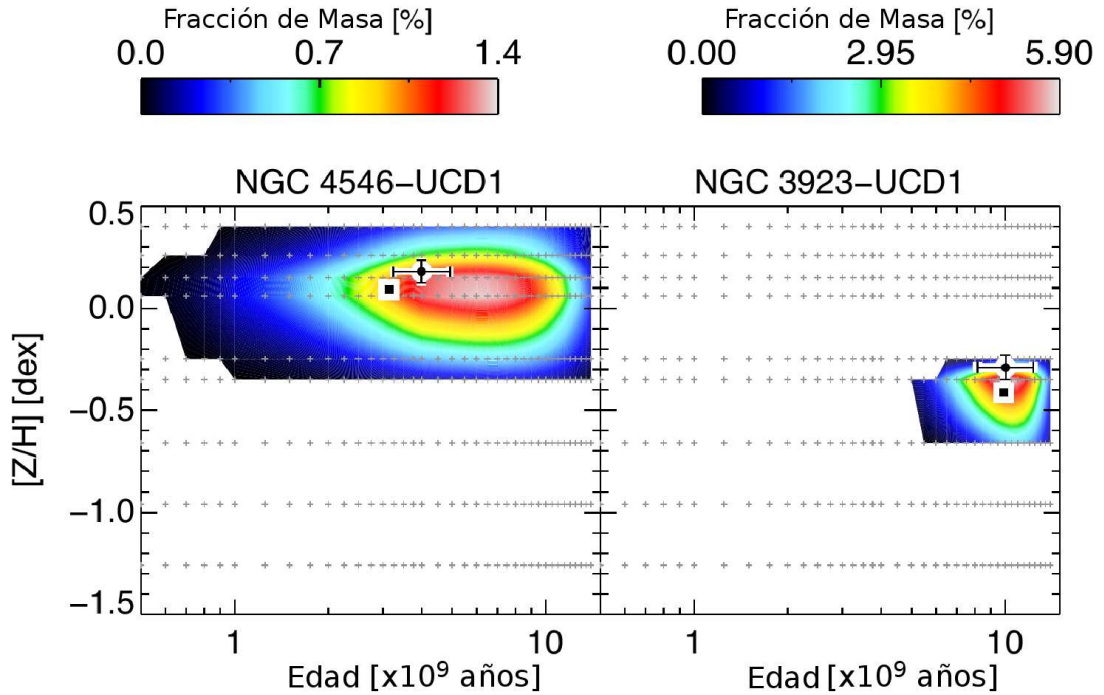


FIGURA 14.9: Panel izquierdo: historia de formación estelar obtenida mediante el ajuste entre el espectro integrado de NGC 4546-UCD1, con los modelos SSP de Vazdekis et al. (2015) usando pPXF. Los contornos de diferentes colores indican el peso de cada modelo SSP el cual es equivalente a la distribución de masa de edad-cero de la historia de formación estelar. Las regiones blancas indican los modelos que contribuyen sin flujo durante el ajuste. Las cruces grises pequeñas indican la edad y $[Z/H]$ de cada uno de los modelos disponibles. El círculo blanco con el punto negro muestra la ubicación en edad y metalicidad de la UCD obtenido mediante la utilización de los índices de Lick. Los cuadrados concéntricos blanco y negro muestran la ubicación de dicho objeto obtenido a partir del método de ajuste espectral completo. Panel derecho: historia de formación estelar del CG tipo UCD NGC 3923-UCD1.

masivo en el Universo temprano. El elevado valor absoluto de la metalicidad también es inusual para la mayoría de las poblaciones de galaxias; sólo 38 de cada 259 galaxias del ATLAS^{3D} tienen $[Z/H] > 0.15$ dentro de $R_{\text{ef}}/8$. Esto significa que esta UCD es tan rica en metales como las regiones interiores de algunas galaxias masivas. Sin embargo, altas metalicidades parecen ser una característica bastante común en UCDs sospechadas de ser el núcleo remanente de una galaxia enana; en particular, como sucede en el caso de M60-UCD1 (Strader et al., 2013).

La evolución de la metalicidad en NGC 4546-UCD1 también es intrigante. El hecho de que la metalicidad se haya mantenido relativamente constante durante el período de formación estelar, indica que la proto-UCD posiblemente acreció regularmente gas fresco y/o estrellas de baja metalicidad, presumiblemente, de un disco galáctico rico en gas y con formación estelar. La historia de formación estelar de este objeto es similar a la encontrada en la muestra de siete galaxias compactas masivas a bajo *redshift* (Ferré-Mateu et al., 2012) y al caso del presumible núcleo (CG M54) de la galaxia enana de

Sagitario. Por el contrario, el comportamiento de la UCD tipo CG de NGC 3923, es exactamente como se espera para un objeto formado en un solo suceso de formación con una metalicidad fija.

Capítulo 15

Conclusiones

Se han obtenido datos fotométricos de siete galaxias S0 ubicadas en ambientes de baja densidad, tales como el campo y grupos pobres. Una de ellas, NGC 5838, pertenece a un subgrupo de un grupo más rico, conocido como Grupo NGC 5846. Todas ellas se observaron utilizando los instrumentos GMOS de los telescopios Gemini Sur y Gemini Norte. Los filtros utilizados fueron el g', r', i' . En el caso particular de la galaxia lenticular de campo NGC 4546, además se obtuvieron imágenes a través del filtro z' , y espectroscopía multi-objeto utilizando el mismo instrumento.

El objetivo de esta Tesis se centró en caracterizar los sistemas de CGs de la muestra observada, y buscar evidencias sobre la formación de las mismas. Cabe destacar que salvo el caso de NGC 3414 y NGC 6861, las cuales habían sido previamente estudiadas por Kundu & Whitmore (2001) (aunque solo la región más interna, ya que en dicho estudio se utilizó un instrumento de pequeño campo de visión), ninguno de los demás sistemas habían sido previamente analizados. Las diferentes características observadas en estas galaxias, se pueden resumir de la siguiente manera:

- **NGC 2549:** el análisis de la distribución de brillo, muestra que la región interna de esta galaxia ($r_{\text{eq}} < 0.3$ minutos de arco) presenta un pequeño bulbo, el cual se evidencia por el cambio de sus isofotas tipo “caja” (para el mencionado bulbo) a “disco” (para la componente de disco). Como se ha mencionado en el desarrollo de esta Tesis, cabe recordar también que las isofotas “caja” pueden indicar algún tipo de interacción o fusión reciente. Por fuera del bulbo, se evidencian estructuras de anillos, los cuales presentan un color $(g' - i')_0 \sim 1.15$. Esto indicaría que los mismos se encuentran muy posiblemente constituidos por una población estelar vieja. La presencia de estos anillos en galaxias carentes de barras y/o evidencias de colisión, indican que el origen de los mismos puede deberse a otros efectos. Por ejemplo, otros escenarios menos “populares” incluyen las opciones de la acreción

de gas en forma suave mediante interacciones de marea, o a través de filamentos cosmológicos durante el ensamble jerárquico de la materia. En el caso particular de NGC 2549, posiblemente esta última opción sea la más probable.

El análisis de la distribución de color integrado de los CGs no muestra signos de una clara bimodalidad, aunque el sistema resulta obviamente no unimodal. Sin embargo, al analizar la distribución de color a diferentes radios galactocéntricos, es posible distinguir la presencia de la subpoblación azul, la cual domina la muestra, una subpoblación roja clásica, y un pequeño grupo de candidatos a CGs que presentan colores más rojos. Una particularidad que se observa en la distribución espacial de estas subpoblaciones, es que los candidatos azules muestran un marcado grado de concentración hacia la galaxia, similar al de los candidatos rojos. Además, tanto la subpoblación azul como la roja muestran achatamiento espacial muy notable y similar al de la componente estelar de la galaxia. Curiosamente, además, la componente estelar muestra un perfil que presenta una pendiente mayor incluso que la de los CGs rojos. Estos resultados son, en cierta forma poco usuales dentro del ámbito de los sistemas de CGs en galaxias de tipo temprano, ya que lo usual es que la población azul sea mucho más extendida que la roja.

Como se observa en otros sistemas de CGs pertenecientes a galaxias de tipo temprano, el color de la galaxia en su zona más interna, resulta similar al de la subpoblación roja. Además de ello, y si bien se cuenta con muy pocos puntos de muestreo, la subpoblación azul parece mostrar un gradiente. Ello se ha observado en otras galaxias y se interpreta como un gradiente de metalicidad que indicaría un proceso disipativo de formación de CGs (Forbes & Forte 2001; Forbes et al. 2011). La FLCG en NGC 2549 también presenta un comportamiento muy notable, ya que a diferencia de lo que es usual encontrar en los sistemas de CGs, esta se describe razonablemente bien por una ley exponencial, sin una clara presencia del TO. Al dividir la muestra en azules y rojos, se observó que son estos últimos los responsables de tal comportamiento, ya que la subpoblación azul muestra un posible máximo. Por este motivo, se optó por utilizar la función de luminosidad de los CGs azules para estimar el módulo de distancia de NGC 2549. Sin embargo, el valor obtenido resultó aproximadamente una magnitud mayor a las estimaciones encontradas en la literatura. Es importante mencionar, sin embargo, que debido al bajo conteo de candidatos que presenta dicha subpoblación, este resultado debe tomarse con cautela.

Por los motivos antes expuestos, solo se pudo obtener una cota inferior en el número total de CGs de NGC 2549, el cual resultó en 263 ± 20 CGs (considerando una extensión máxima de su sistema de CGs hasta 100 kpc). Este valor se traduce en un frecuencia específica de $S_N = 4.4 \pm 0.7$.

El comportamiento notable de la distribución espacial de los candidatos, sumado a la falta de un pico claro en la FL, indican que el sistema de CGs de esta galaxia dista mucho de ser “típico”. En particular, se ha observado un comportamiento similar de la FL de los CGs rojos en NGC 1316 (Goudfrooij et al. 2004; Sesto et al., *enviado*). Dicha galaxia constituye un ejemplo claro de fusión reciente, por lo que se interpreta que la ausencia de un máximo en la FL de los CGs es un indicativo de que NGC 1316 posee un sistema de CGs complejo, con cúmulos jóvenes que no han evolucionado dinámicamente. Esto podría explicar lo observado en NGC 2549, ya que por ejemplo, las estimaciones de la edad del bulbo indican que ha formado estrellas hasta hace unos 2×10^9 años. Sin embargo, siendo que no hemos detectado estructuras tidales obvias, no resulta directa la similitud entre ambos casos.

Por otro lado, algunas teorías sobre la formación de los sistemas de CGs postulan que los CGs azules se forman en una primera etapa, y luego además de formar los CGs rojos en una segunda etapa (y así generar la bimodalidad), también se acretan pequeños fragmentos de baja metalicidad del entorno galáctico los cuales traen más CGs azules (Côté et al., 1998). Este proceso explica usualmente la menor concentración y gran extensión espacial de los mencionados CGs. En tal contexto, una posible explicación para la alta concentración espacial de los CGs azules de NGC 2549, es que por alguna razón tal proceso de acreción de CGs azules no haya sido eficiente.

- **NGC 2880:** muestra una apreciable variación en el AP y e hacia la zona interna ($r_{eq} < 0.2$ minutos de arco), originada por la presencia de una barra débil. Hacia radios mayores, comienza a dominar la presencia de un disco rodeado de un halo luminoso. Al restar dicho halo, diferentes estructuras de bajo brillo superficial se vuelven visibles. Esto indica que NGC 2880 ha sufrido posiblemente algún tipo de proceso de interacción o evento de fusión menor. Dado que estamos hablando de una galaxia de campo, este resultado es notable por sí mismo.

Al analizar la distribución de color de la muestra de candidatos a CGs, la misma se presenta casi unimodal aún cuando se analiza a diferentes radios galactocéntricos. Sin embargo, al igual que en NGC 2549, es posible distinguir la subpoblación azul dominante y la subpoblación roja de CGs menos conspicua, además de un grupo de candidatos a CGs con colores más azules que la primer subpoblación mencionada. La distribución espacial de los CGs azules y rojos muestra, al igual que en el caso de NGC 2549, pendientes muy similares. Sin embargo, en este caso parecen ser los CGs rojos los que muestran una menor concentración de lo que se observa en otros sistemas de CGs. Además de ello, ambos subsistemas también resultan notablemente elongados, mostrando indicios de una diferencia en sus AP . Sumado a esto, se observa un “déficit” de CGs en ciertas zonas. Dado que no se cuenta con un cubrimiento areal completo, resulta difícil concluir algo al respecto. Sin

embargo, de ser real, la explicación obvia de tal efecto es un proceso de fusión que haya involucrado una población significativa de CGs. Esto es así, ya que al ser una población vieja, los sistemas de CGs son tales que se encuentran dinámicamente evolucionados y bien mezclados.

Al igual que en NGC 2549, la subpoblación roja muestra un color medio muy similar al de la zona interna de la galaxia, mientras que en los candidatos azules se observa la presencia de un gradiente en el color.

Utilizando la muestra completa de candidatos a CGs y la subpoblación azul, se estimó el valor del módulo de distancia de NGC 2880, a partir de las respectivas FLCGs. En ambos casos, se obtuvo un valor de $(m - M) = 31.97$ mag, el cual se encuentra en buen acuerdo con el valor utilizado en esta Tesis como así con el valor obtenido por Theureau et al. (2007) de $(m - M) = 32.06 \pm 0.40$ mag. La estimación de la población total considerando una extensión total para el sistema de unos 100 kpc, resulta en 532 ± 130 CGs, correspondiente a una frecuencia específica de $S_N = 4.5 \pm 1.2$.

- **NGC 2612:** aún sin la presencia clara de vecinos de brillo comparable, esta galaxia dominada por su disco, presenta regiones de polvo asimétricas que cruzan en forma perpendicular el mismo. Este tipo de estructuras se debe haber originado como consecuencia de transferencia de masa de una compañera durante un encuentro cercano o fusión, o bien, mediante la acreción de una nube de gas y polvo del medio intergaláctico. En cualquier caso, resulta una estructura notable.

Por otra parte, su sistema de CGs presenta un bajo número de candidatos, con lo cual no permite caracterizar en forma adecuada las posibles diferentes subpoblaciones de CGs en ella. Aún con estas limitaciones, luego de realizar las correspondientes correcciones por contaminación en su distribución de color integrado, sobrevive un grupo de candidatos con color $(g' - i')_0 \sim 0.9$ mag. Si bien el sistema es muy pobre, la distribución espacial de estos candidatos muestra una significativa concentración hacia la galaxia, presentando una elipticidad elevada.

Al igual que en las galaxias antes mencionadas, se obtuvo un gradiente para la muestra completa de candidatos a CGs. Sin embargo, es necesario considerar que el mismo puede estar reflejando la mezcla de diferentes subpoblaciones de CGs presentes en esta galaxia.

A partir del único valor de distancia encontrado en la literatura para NGC 2612, se intentó verificar el mismo mediante el empleo de la FLCG. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el bajo conteo de candidatos resulta inadecuado para tal fin. La población total estimada para esta galaxia resulta en 140 ± 30 CGs, lo que corresponde a $S_N = 1.1 \pm 0.3$.

- **NGC 4546:** al igual que NGC 2880, esta galaxia muestra una considerable variación en sus parámetros isofotales en la región interna ($r_{\text{eq}} < 0.2$ minutos de arco), debido probablemente a la presencia de una barra. Además, se observa una extensa estructura irregular de polvo a lo largo del semieje mayor, la cual podría estar relacionada a un evento de fusión con un objeto rico en gas y polvo, de menor masa que NGC 4546.

En cuanto a la distribución de colores, esta galaxia resultó claramente trimodal. Contar con observaciones en la banda z' permitió ampliar el rango espectral en la distribución de color, lo cual posibilita separar más limpiamente la presencia de la subpoblación azul, roja y la tercera subpoblación con colores intermedios entre ellas. Estas dos últimas subpoblaciones dominan la muestra, presentando una concentración espacial más fuerte hacia el centro de la galaxia, y una e elevada, la cual resulta incluso mayor a la exhibida por la componente estelar de NGC 4546. En particular, las subpoblaciones rojas de esta galaxia y la de NGC 3414, presentan las concentraciones más altas de toda la muestra de galaxias estudiada aquí, además de posibles “core”.

Si bien nuestra fotometría se encuentra dominada por las subpoblaciones intermedia y roja, queda evidenciado que los CGs azules llenan completamente el mosaico de imágenes. Por ello, es de esperar que si se contara con un cubrimiento areal completo, la población de CGs azules sería posiblemente muy notable.

Utilizando la muestra completa de candidatos a CGs, se estimó el módulo de distancia a esta galaxia, siendo una magnitud mayor al compararlo con el obtenido por Tully et al. (2013). Sin embargo, al utilizar la FLCG de la subpoblación azul para obtener nuevamente dicho valor, el mismo resulta de $(m - M) = 30.77$ mag, estando en buen acuerdo con el trabajo mencionado anteriormente. Resulta claro que la utilización de los cúmulos azules ofrece una alternativa para estimar distancias. Considerando una extensión máxima de 100 kpc para el sistema de NGC 4546, el número total de CGs obtenido resulta de 426 ± 60 CGs, lo que se traduce en una frecuencia específica de $S_N = 2.8 \pm 0.5$.

La utilización de datos espectroscópicos permitió confirmar los primeros 13 CGs pertenecientes a esta galaxia a través de la determinación de sus velocidades radiales, y realizar un estudio detallado de la población estelar de un objeto de tipo UCD previamente reportado en este sistema. A partir de mediciones de edades y metalicidades sobre estos trece objetos, obtuvimos que NGC 4546 presenta diferentes subpoblaciones de CGs. Las edades resultantes van desde los 3×10^9 a los 15×10^9 años, mientras que las metalicidades abarcan el rango usual para los CGs. En particular, al menos, un CG de $S/N > 20$ presenta una edad intermedia de $\sim 5 \times 10^9$ años, y varios de menor S/N podrían ser similares. La presencia de objetos con estas edades contrasta con el resultado obtenido sobre la edad de

la galaxia en $11.7_{-1.0}^{+1.1} \times 10^9$ años. Sobre todo porque hemos encontrado que la población intermedia y la componente estelar difusa de la galaxia presentan una pendiente similar en su distribución espacial proyectada. Por otro lado, el perfil de color $(g' - z')_0$ de NGC 4546 en la zona interna, presenta un color medio entre la subpoblación intermedia y roja. Esta diferencia indicaría que los cúmulos intermedios y parte de los rojos se originaron en un *merger*, el cual a su vez dio origen a una fracción de la población estelar difusa. Si esto es así, entonces dicha región debería mostrar edades similares a la UCD y a los CGs jóvenes, sin embargo esto no ocurre. En este sentido, es necesario ampliar el estudio sobre esta particular galaxia.

Por su parte, el estudio de la UCD revela que es un objeto extremadamente rico en metales, el cual formó estrellas durante un período prolongado de tiempo. También debemos mencionar que todos los objetos de alta S/N , que pertenecen a la subpoblación de CGs rojos, muestran como es de esperar, alta metalicidad.

Todos estos hallazgos (además del posible “camino” de CGs detectado), puestos en conjunto indican que NGC 4546 ha sufrido un proceso de interacción y fusión con un objeto rico en metales, del cual la actual UCD bien podría ser el núcleo. Tal fenómeno, muy posiblemente fue también responsable de la formación de un gran número de nuevos CGs, los cuales forman actualmente parte de la subpoblación con colores intermedios y rojos. La formación de dichos CGs, si se restringió a la zona más interna de la galaxia, podría además explicar la alta concentración espacial de los candidatos de dichas subpoblaciones.

- **NGC 3414:** la morfología que muestra esta galaxia genera aún hoy controversias. Rodeando el bulbo de la misma, se aprecia una región de polvo en forma de remolino, muy compleja, con una posible barra o disco ubicado en forma perpendicular a dicha estructura. También, se observan cáscaras (*shells*) ubicadas en el extremo de esta posible barra/disco. La presencia de cáscaras y regiones de polvo indicarían al menos dos eventos de fusión distintos, dado que para su formación, NGC 3414 debe haber acretado o fusionado objetos de menor masa con un bajo y alto contenido de gas, respectivamente.

Al analizar la distribución de color integrado del sistema de CGs de NGC 3414, se observa la presencia de al menos cuatro subpoblaciones diferentes de CGs, los cúmulos azules, los cuales muestran la menor concentración espacial de la muestra, los intermedios y rojos, mostrando una mayor concentración hacia la galaxia, y la presencia en menor medida de un grupo de CGs con colores más rojos que estos últimos, encontrándose hacia la región central. Los CGs rojos, parecen mostrar además un “core”. Al igual que la componente estelar de la galaxia, las subpoblaciones presentan un bajo valor de e , por lo que no fue posible medir su orientación

específica, excepto para la subpoblación intermedia cuya e resulta significativa en comparación con las restantes.

Al comparar el perfil de luz de esta galaxia con el perfil de densidad proyectada de las distintas subpoblaciones, hemos encontrado que el mismo muestra una pendiente muy similar a la de los CGs de la subpoblación más roja. Incluso, al observar el diagrama en función de $R^{1/4}$, se puede ver que la distribución de luz de NGC 3414 puede ser bien descrita por una ley de de Vaucouleurs. Esto resulta interesante en el contexto de la discusión morfológica de esta galaxia, ya que indicaría que estamos viendo posiblemente una componente esferoidal dominante, y no un disco visto “*face-on*”.

Si bien la distancia estimada a esta galaxia se encuentra estudiada por diversos métodos, se obtuvo aquí un valor estimado del módulo de distancia utilizando la FLCG de la subpoblación azul. El mismo resultó en $(m - M) = 32.21$ mag, encontrándose en buena concordancia con el estimado por Tonry et al. (2001). Considerando una extensión del sistema hasta 100 kpc, el valor obtenido para la población total es de 948 ± 180 CGs. Por su parte, el valor de la frecuencia específica correspondiente es $S_N = 3.4 \pm 0.6$.

- **NGC 5838:** esta galaxia presenta grandes variaciones en sus parámetros isofotales hacia la región interna ($r_{\text{eq}} < 0.6$ minutos de arco), originadas por la presencia de posibles anillos estelares y un anillo de polvo el cual oscurece el núcleo de la misma. Hacia regiones más externas ($0.6 < r_{\text{eq}} < 1.2$ minutos de arco), comienzan a apreciarse diferentes estructuras de bajo brillo superficial, las cuales podrían estar asociadas a otros anillos o estructura espiral, o incluso ser parte de un objeto de menor masa el cual ha sido destruido por NGC 5838. Una particularidad menos evidente que no se aprecia en las demás galaxias, es la asimetría en el color que presenta el disco de NGC 5838, al observar su mapa de color.

El análisis de la distribución de color del sistema de CGs, muestra una clara separación entre las subpoblaciones azul y roja, así como la presencia de un tercer grupo de candidatos hacia colores más rojos. Al igual que en el caso de NGC 2549, las subpoblaciones azul y roja presentan un grado de concentración similar hacia la galaxia. Sin embargo, los candidatos azules parecerían mostrar un *core*. Las orientaciones de estos subsistemas resultan similares a la componente estelar de NGC 5838, pero con una mayor elipticidad $e \sim 0.8$). Esto resulta muy notable, ya que es todo el sistema en conjunto el que muestra tal alto achatamiento. Recordemos que es “normal” encontrar que los CGs azules se encuentran distribuidos de manera más extendida y con cierta simetría esférica.

Otra de las características notables en ambas subpoblaciones, es la presencia de gradientes en el color en función del radio galactocéntrico, principalmente en los

candidatos azules. Estos gradientes, como ya se mencionó, indican que el evento de formación de dichas subpoblaciones involucró ciertos procesos disipativos.

Nuevamente, al igual que en NGC 2549, resulta muy llamativa la alta concentración espacial de los CGs azules. Los comentarios realizados para el caso de dicha galaxia, son entonces aplicables aquí también.

En lo referente al perfil de luz, este resulta extremadamente complejo (debido a las múltiples componentes que presenta), por lo que no es directa la comparación con los perfiles de los CGs. Sin embargo, como es usual, el color de la zona interna de la galaxia resulta similar a la subpoblación de CGs rojos.

La estimación del módulo de distancia a esta galaxia se realizó utilizando la FLCG de la subpoblación azul, obteniéndose el valor $(m - M) = 32.17$ mag. Dicho valor se encuentra en excelente acuerdo con el de Theureau et al. (2007) ($(m - M) = 32.17 \pm 0.45$ mag), que ha sido utilizado en esta Tesis. Al estimar el número total de CGs considerando el sistema hasta 100 kpc, se obtuvieron 1023 ± 200 CGs. De acuerdo al valor de la magnitud absoluta considerada para la galaxia, la frecuencia específica asociada es $S_N = 3.2 \pm 0.7$.

- **NGC 6861:** al igual que varias de las galaxias de esta muestra, esta galaxia presenta signos claros de fusión y/o interacción pasada con un objeto de menor masa. Los indicios son variados y van desde la presencia de isofotas no concéntricas, hasta las diferentes estructuras que quedan en evidencia al sustraer el brillo del halo. Además, en la zona más interna ($R_{\text{gal}} < 10$ segundos de arco) se aprecia una región de polvo y un disco estelar en esta galaxia.

La distribución de color integrado presenta varias subpoblaciones de CGs diferentes, similar a los casos de NGC 4546, NGC 3414 y NGC 5838, aunque la separación en color no es tan clara. Hemos detectado los clásicos azules y rojos, y una tercera subpoblación con colores intermedios. Al analizar la distribución espacial y acimutal de los candidatos rojos e intermedios, los mismos muestran una mayor concentración en comparación con los candidatos azules, y una e levemente superior en comparación a la componente estelar de la galaxia.

El perfil de luz que hemos obtenido, muestra una pendiente similar a la de la subpoblación roja. Esto mismo se cumple para el color interno de la galaxia, el cual resulta muy similar al color medio de dicha subpoblación.

Al igual que en varias de las galaxias anteriormente mencionadas, se utilizó la FLCG de la subpoblación azul para estimar el módulo de distancia de esta galaxia, el cual resulta en $(m - M) = 32.1$ mag. Este valor se encuentra en buen acuerdo con el valor obtenido por Tonry et al. (2001) ($(m - M) = 32.24 \pm 0.36$ mag). Por otro lado, estimamos una población total para el sistema de NGC 6861 en 3000 ± 300 CGs (hasta 100 kpc), correspondiente a una frecuencia específica de

$S_N = 9.2 \pm 2.2$. Este valor resulta el más alto medido dentro de la muestra de galaxias, y uno de los más altos determinados de manera segura presentes en la literatura.

Un análisis adicional realizado sobre la distribución de color y la distribución espacial de la subpoblación azul de NGC 6861, revela la presencia del *blue-tilt*, y la notable similitud que muestra dicha subpoblación con el perfil de brillo superficial de rayos-X de la galaxia. Este último resultado indicaría que NGC 6861 sería la galaxia dominante en un subgrupo de galaxias, el cual se encuentra en proceso de fusión con el subgrupo que domina su vecina NGC 6868.

Como se mencionó al inicio de esta Tesis, todos los mecanismos propuestos para detener la formación estelar en los discos de galaxias espirales, y transformarlas luego en lenticulares, actúan eficientemente en ambientes densos. Por ello, al considerar galaxias ubicadas en ambientes de baja densidad, dichos mecanismos resultan insuficientes. Sin embargo, aun perteneciendo al campo, sería incorrecto pensar que dichas galaxias evolucionan en una “caja cerrada”. Como se observó en la muestra de galaxias estudiadas aquí, las mismas presentan diversas estructuras, posiblemente asociadas a interacciones y/o fusiones con objetos de diversa índole, y/o también debidas a la acreción de gas y polvo del medio intergaláctico. A primera vista, estos fenómenos estarían en mejor acuerdo a la teoría de evolución inversa, en donde inicialmente todas las galaxias de disco comenzarían como S0 a *redshifts* de $z = 2 - 3$, y luego a $z < 1$ gran parte de ellas se convierten en espirales mediante la continua acreción de gas en sus discos, hasta formar brazos espirales e iniciar nuevamente formación estelar. Sin embargo, la pregunta que surge aquí es, ¿qué sucede con los CGs originales de las S0 cuando comienza esta transformación?

Las poblaciones de CGs de las galaxias de la muestra resultaron ser sistemas complejos en todos los casos, mostrando la presencia de múltiples subpoblaciones, características no tan “clásicas” entre los cúmulos azules y rojos, y un gran número de objetos, entre otras particularidades. En este aspecto, resulta claro que los experimentos propuestos por otros autores para poner a prueba las distintas teorías sobre la formación de las galaxias S0 empleando sus sistemas de CGs, deben ser considerados solo como un primer paso, que requiere de un análisis más complejo. Por ejemplo, dada la variedad de valores del parámetro S_N de las galaxias de esta muestra, y de otras reportadas en la literatura (Harris et al., 2013), y la gama de particularidades que hemos detectado, parece poco probable que se puedan obtener conclusiones firmes en base a un análisis de S_N vs. color como el presentado por Aragón-Salamanca et al. (2006).

15.1 Trabajo a futuro

Los datos y resultados presentados en esta Tesis representan el primer paso en el proceso de la profundización del estudio de los sistemas de CGs de las galaxias lenticulares. Como se mencionó aquí, una vez caracterizados dichos sistemas, se podrá avanzar de manera más firme en la evaluación de las distintas teorías de formación y evolución de sus galaxias S0 anfitrionas.

Las diversas, y en varios casos singulares propiedades exhibidas por algunos de estos sistemas, tales como la existencia de múltiples subpoblaciones de CGs y subestructuras difusas, indican que la mayoría de las galaxias estudiadas han sufrido probablemente eventos violentos. De la muestra originalmente propuesta para estudiar, a priori únicamente NGC 3414 representaba un muy probable caso de interacción. El hallazgo de múltiples indicios resumidos en la sección anterior, lleva en forma directa a plantearse una pregunta: ¿dichos eventos podrían ser, o no, los responsables de sus morfologías actuales? La respuesta está abierta, ya que de lo expuesto en los capítulos anteriores se desprende que aún queda mucho por hacer y explorar.

Por estos motivos, la siguiente etapa en esta investigación requerirá profundizar en la interpretación de los resultados obtenidos aquí, sobre todo, en lo referente a la presencia de las distintas subpoblaciones de CGs. En un primer paso, se planea comparar los colores de dichas subpoblaciones con modelos de poblaciones estelares simples tales como los denominados PARSEC (Bressan et al., 2012), y tener así una primera aproximación que nos permita describir cualitativamente dichas subpoblaciones. A su vez, resultan claras las ventajas de contar con espectroscopía multi-objeto tal como la presentada para el caso de NGC 4546, y/o fotometría en el IR cercano que junto con la utilización de modelos de poblaciones estelares, nos permita romper con la denominada degeneración edad-metalicidad. Estas herramientas nos permitirán obtener no solo valores de edades, metalicidades y abundancias de elementos- α de los CGs, sino también nos permitirán realizar análisis cinemáticos de los mismos. Tal como se ha mostrado en algunos ejemplos de la literatura, es posible identificar subestructuras cinemáticas en los sistemas de CGs que nos permiten comprobar si algunas subpoblaciones han surgido por eventos violentos o acreción de subsistemas.

Por otro lado, dado que los procesos propuestos para explicar el origen de las galaxias lenticulares permiten hacer algunas predicciones sobre el producto final de dicha transformación, resultará extremadamente valioso también obtener estimaciones más precisas de los parámetros de poblaciones estelares en los discos, bulbos y/o halos de las galaxias.

Apéndice A

Comparación fotométrica

A.1 Introducción

Los grandes relevamientos fotométricos y la necesidad de trabajar con fuentes cada vez más débiles, han generado un aumento en la demanda de herramientas para obtener estimaciones fotométricas precisas y confiables de diversos parámetros, minimizando el número de pasos en el procesamiento de los mismos.

Entre los software más utilizados para la construcción de dichos catálogos se encuentran DAOPHOT II (Stetson, 1987) y SExtractor (Bertin & Arnouts, 1996). El primero, diseñado para trabajar en conjunto con la tarea ALLSTAR, es conocido tradicionalmente por realizar mediciones fotométricas precisas de objetos no resueltos mediante el ajuste de la *Point Spread Function* (PSF), aun en campos donde los objetos a medir se encuentran muy apiñados. No obstante, DAOPHOT requiere un trabajo detallado que resulta algo engorroso cuando se intenta medir un gran número de imágenes. SExtractor, por su parte, permite la construcción de catálogos fotométricos de una gran cantidad de fuentes, tanto puntuales como extendidas, de manera extremadamente rápida y con poca intervención del astrónomo. Sin embargo, es conocido que la calidad de la fotometría de objetos puntuales es menor que la brindada por DAOPHOT. Es por ello que en los últimos años se ha comenzado a implementar el modelado de PSF mediante la herramienta PSFEx (PSF Extractor), la cual trabaja en conjunto con SExtractor.

Aquí, se compara el desempeño y la confiabilidad de los software PSFEx y del tradicional DAOPHOT II en la construcción y modelado de la PSF sobre imágenes reales. Ambos métodos de análisis se utilizaron en conjunto con SExtractor, analizando el sistema de CGs de la galaxia lenticular NGC 3414, empleando imágenes Gemini/GMOS en los filtros $g'r'i'$. A partir de la fotometría PSF realizada por ambos software sobre todos los objetos puntuales/no resueltos detectados en los campos, se compararon diferencias en las magnitudes, y en el típico diagrama color-magnitud. En este mismo contexto,

se analizó el nuevo parámetro *spread_model* utilizado por SExtractor+PSFEx, el cual permite clasificar entre objetos puntuales y extendidos.

A.1.1 Construcción del modelo PSF

El software PSFEx considera para la construcción del modelo PSF una caja de $N \times N$ píxeles centrada en los objetos estelares de la imagen. Dentro de la misma, se modela la variación de la PSF a lo largo de las posiciones x, y como suma de polinomios:

$$PSF(x, y) = PSF^0(i, j) + x PSF^1(i, j) + y PSF^2(i, j) + xy PSF^3(i, j) + x^2 PSF^4(i, j) + y^5 PSF^5(i, j) \quad (A.1)$$

donde (x, y) es la posición en el CCD, (i, j) es la posición de los píxeles dentro de la caja de $N \times N$, y PSF^a los coeficientes asociados a cada término en el polinomio (Mohr et al., 2012).

Como se mencionó anteriormente, SExtractor opera en conjunto con PSFEx, utilizando como entrada para la determinación de magnitudes entre diversos parámetros, el modelo PSF obtenido por este último. Para iniciar el modelado de la PSF, es necesario seleccionar fuentes puntuales sobre la imagen GMOS. Para ello, el archivo de parámetros que utiliza SExtractor para construir el catálogo de salida con la información de las fuentes detectadas, debe contener al menos la siguiente información:

- X_IMAGE, Y_IMAGE: las posiciones x, y de las fuentes detectadas sobre la imagen.
- FLUX_RADIUS: fracción del flujo integrado dentro de un determinado radio. El valor por defecto es 0.5 (radio efectivo).
- FLAGS: indicadores utilizados por SExtractor durante el proceso de detección, los cuales proveen información sobre objetos saturados, superposición de objetos, regiones dañadas de la imagen, etc.
- FLUX_APER: flujo medido dentro de una apertura circular.
- ELONGATION: achatamiento del objeto.
- VIGNET(N,N): región de $N \times N$ píxeles alrededor de cada fuente, donde se obtendrá el modelo PSF. En el caso de imágenes GMOS, es recomendable utilizar un ancho de 5.5 FWHM.

En la Figura A.1 se muestra la fracción de flujo medido de cada fuente en función de la magnitud, utilizando en este caso la magnitud MAG_AUTO disponible dentro de las opciones de SExtractor (MAG_AUTO mide el flujo de una fuente dentro de una apertura

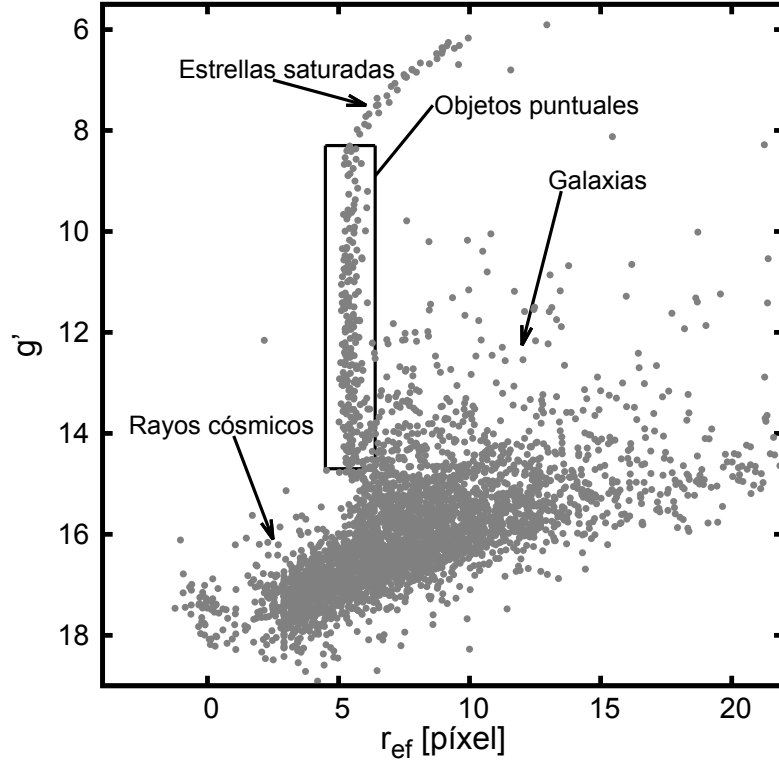


FIGURA A.1: Radio efectivo (r_{ef} estimado mediante el parámetro FLUX_RADIUS) en función de la magnitud (MAG_AUTO) para las fuentes detectadas en el campo de NGC 3414. El rectángulo negro encierra los objetos considerados puntuales que serán utilizados por PSFEx para el modelado de la PSF.

elíptica, Kron 1980). En dicha figura se aprecia la ubicación de los objetos resueltos (galaxias de fondo), la detección de rayos cósmicos, los objetos saturados y las fuentes consideradas como puntuales. La elección de estos objetos requeridos por PSFEx, se realiza mediante los siguientes parámetros ubicados en el archivo de configuración de dicho software:

- SAMPLE_FWHMRANGE: indica el rango de FWHM donde se seleccionarán los candidatos para el modelado de la PSF.
- SAMPLE_VARIABILITY: variación permitida en el valor de FWHM entre los objetos puntuales sobre la imagen. Comúnmente, un valor de 0.2 (20%) es adecuado para imágenes GMOS.
- SAMPLE_MINSN: valor mínimo permitido en la S/N de los candidatos puntuales.
- SAMPLE_MAXELLIP: máxima elipticidad permitida para los candidatos puntuales no saturados. Un valor de 0.3 resulta aceptable en el caso de imágenes GMOS.

Por último, otros parámetros importantes que deben considerarse antes de ejecutar PSFEx, son:

- PSFVAR_KEYS: parámetros de SExtractor de los que dependerá la PSF. Usualmente, se utilizan las posiciones espaciales de los objetos en la imagen (X_IMAGE, Y_IMAGE).
- PSFVAR_DEGREES: orden del polinomio de ajuste (Ecuación A.1). En el caso de imágenes GMOS, es recomendable utilizar un polinomio de segundo orden.

Una detallada descripción de los diferentes parámetros y capacidades que brinda el software PSFEx, así como un estudio realizado sobre datos simulados, se encuentran en los trabajos de Bertin (2011) y Annunziatella et al. (2013), respectivamente.

La ejecución de PSFEx genera diversos valores y archivos resultantes que deben ser controlados por el usuario. Los objetos que el software seleccionó para el modelado de la PSF se observan en el panel izquierdo de la Figura A.2. Por su parte, el panel derecho de dicha figura presenta el mapa de residuos obtenido luego del ajuste del modelo PSF sobre cada fuente puntual. En esta etapa, el usuario debe controlar que los residuos obtenidos luego de aplicar el modelo PSF hayan quedado aceptables, con un valor de χ^2 cercano a 1. En el caso de que alguna de las fuentes utilizadas para realizar el modelo PSF presente algún artefacto, rayo cósmico y/o vecino cercano que no haya sido detectado previamente por SExtractor, y que además se encuentre dentro de la región de $N \times N$ píxeles, el usuario debe descartarlas del ajuste y volver a ejecutar PSFEx.

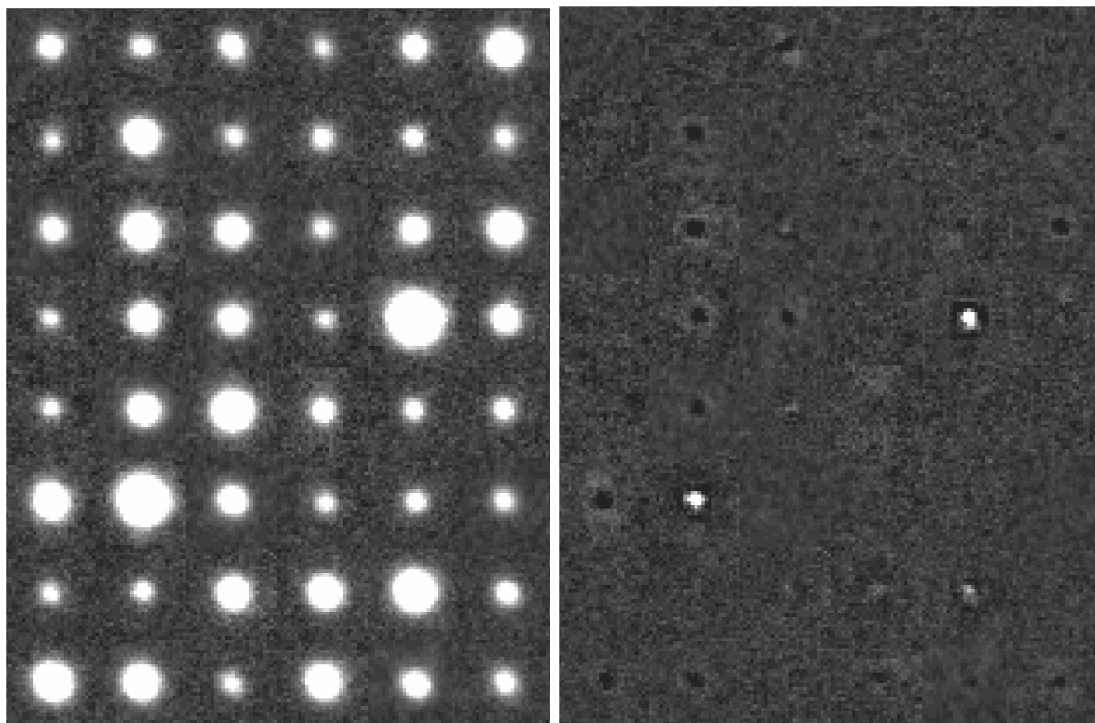


FIGURA A.2: Panel izquierdo: objetos puntuales utilizados por PSFEx para realizar el modelo de PSF. Panel derecho: mapa de residuos obtenido a partir de la resta del modelo PSF sobre los mismos objetos.

El modelo resultante PSF se utiliza en conjunto con SExtractor nuevamente (proceso mencionado en la Sección 4.1), para realizar la detección y clasificación de las fuentes

presentes en los campos GMOS. En este caso, se adicionan al archivo de salida las magnitudes PSF obtenidas mediante el modelo PSF y el valor del parámetro de clasificación *spread_model*.

A.1.2 Diagramas color-magnitud

Como se mencionó anteriormente, se realizará una comparación entre las fotometrías obtenidas por DAOPHOT II y PSFEx sobre los datos de la galaxia lenticular NGC 3414, ubicada a 25.2 Mpc, en el grupo LGG 227. A tal distancia, los cúmulos globulares (CGs) aparecen como objetos no resueltos en imágenes como las empleadas en este trabajo. Por ello, es necesario realizar una separación entre los objetos puntuales y extendidos (ver Sección A.1.4), adoptando aquí como objetos no resueltos aquellos que presentan índice de estelaridad (*class_star*) mayor a 0.5. En la Figura A.3 (paneles superiores) se muestran los diagramas color-magnitud obtenidos con DAOPHOT y PSFEx, respectivamente. Ambas figuras lucen muy similares, destacándose con facilidad la presencia de un considerable número de CGs con colores $0.5 < (g' - i')_0 < 1.5$ mag. Además, se intuye el fenómeno de la “bimodalidad” en los colores integrados del sistema de CGs, tal como ocurre en otras galaxias.

Para evaluar la capacidad de PSFEx de producir colores precisos, se analizó la distribución de colores para ambas muestras. En los paneles centrales de la Fig. A.3 se observa que ambos catálogos muestran distribuciones anchas con diferentes subestructuras. Como se vio en el Capítulo 8, NGC 3414 presenta al menos tres subpoblaciones de CGs diferentes, claramente visibles en los radios galactocéntricos $43'' < R_{\text{gal}} < 100''$. Dado que hacia el extremo débil en las magnitudes los errores en ambos catálogos crecen notablemente, se evaluó, mediante el ajuste de distribuciones gaussianas utilizando RMIX, la capacidad de detectar la trimodalidad en el rango antes mencionado, y en las magnitudes $23.5 < g'_0 < 25.5$ mag (paneles inferiores en Fig. A.3). Es posible apreciar que dicho fenómeno es detectable en ambas muestras, resultando más claro en aquella obtenida con DAOPHOT, la cual presenta valores de dispersión menores en comparación con los obtenidos para PSFEx ($\sigma_{\text{dao}} = 0.048 \pm 0.007, 0.027 \pm 0.016, 0.093 \pm 0.013$ y $\sigma_{\text{PSFEx}} = 0.084 \pm 0.017, 0.021 \pm 0.033, 0.101 \pm 0.013$, respectivamente).

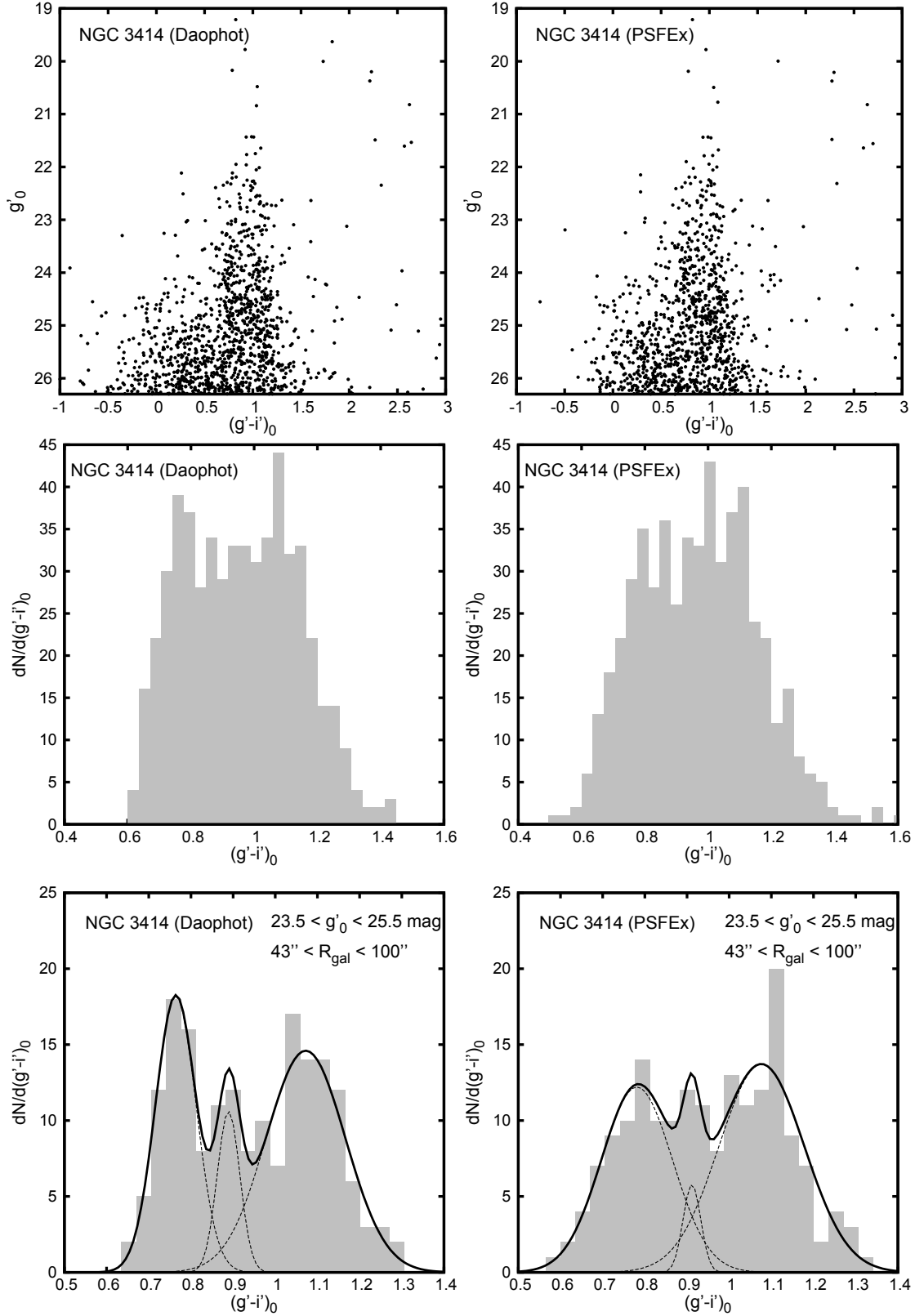


FIGURA A.3: Paneles superiores: diagramas color-magnitud de los objetos puntuales obtenidos mediante DAOPHOT y PSFEX. Paneles centrales: histogramas de color para la muestra total de candidatos a CGs correspondientes a DAOPHOT y PSFEX. Paneles inferiores: histogramas de color correspondientes a los candidatos a CGs con magnitudes entre $23.5 < g'_0 < 25.5 \text{ mag}$ y $43'' < R_{\text{gal}} < 100''$, para DAOPHOT y PSFEX. Las líneas continuas representan el ajuste gaussiano obtenido por RMIX en ambos casos.

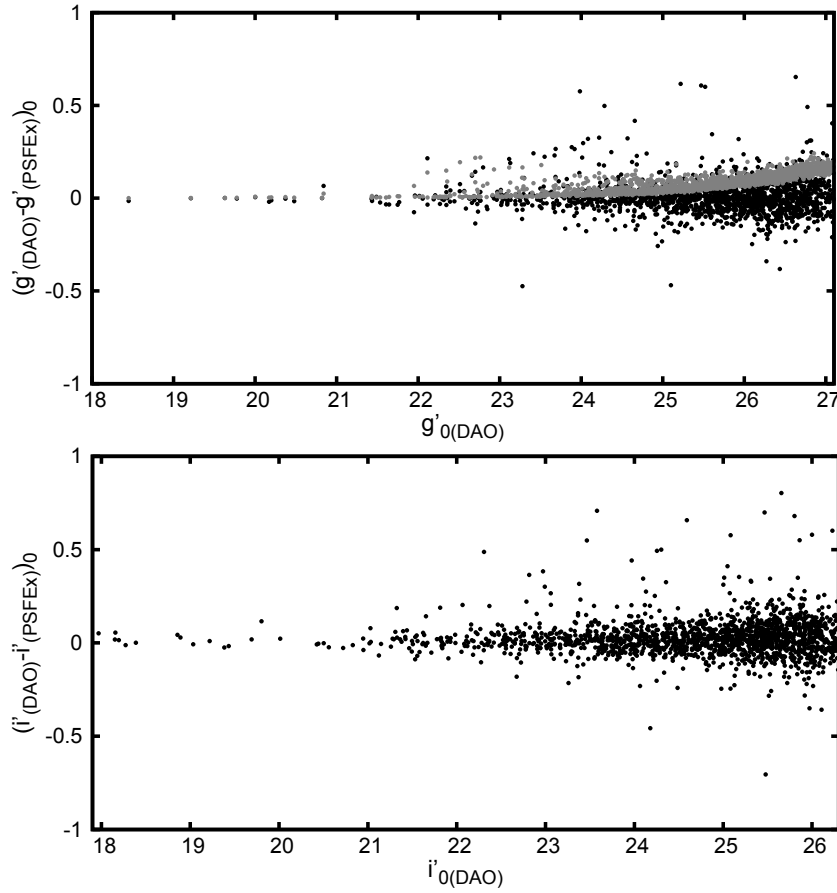


FIGURA A.4: Diferencias de magnitudes obtenidas por DAOPHOT y PSFEx en los filtros g' e i' . Puntos grises representan el error cuadrático de la diferencia de magnitudes en el filtro g' .

A.1.3 Comparación en bandas fotométricas

La Figura A.4 muestra las diferencias de magnitudes, objeto a objeto, en los filtros g' e i' , respectivamente. Puede apreciarse que en todos los casos el comportamiento es acorde a lo esperado, ya que los objetos brillantes muestran muy baja dispersión, y esta comienza a ser considerable recién hacia magnitudes muy débiles. A modo de ejemplo, mediante puntos grises, se presenta el error cuadrático de la diferencia de magnitudes en el filtro g' .

A.1.4 Clasificación

SExtractor en conjunto con PSFEx, permiten utilizar un nuevo parámetro de clasificación (*spread_model*) a partir del modelo PSF obtenido. Se estudió la confiabilidad de dicho índice comparándolo con el conocido *class_star*. La Figura A.5 muestra el comportamiento de los mismos en función de la magnitud g'_0 . Recordemos que el rango de valores producidos por *class_star* varía entre 0 y 1, asignando 0 a objetos que el

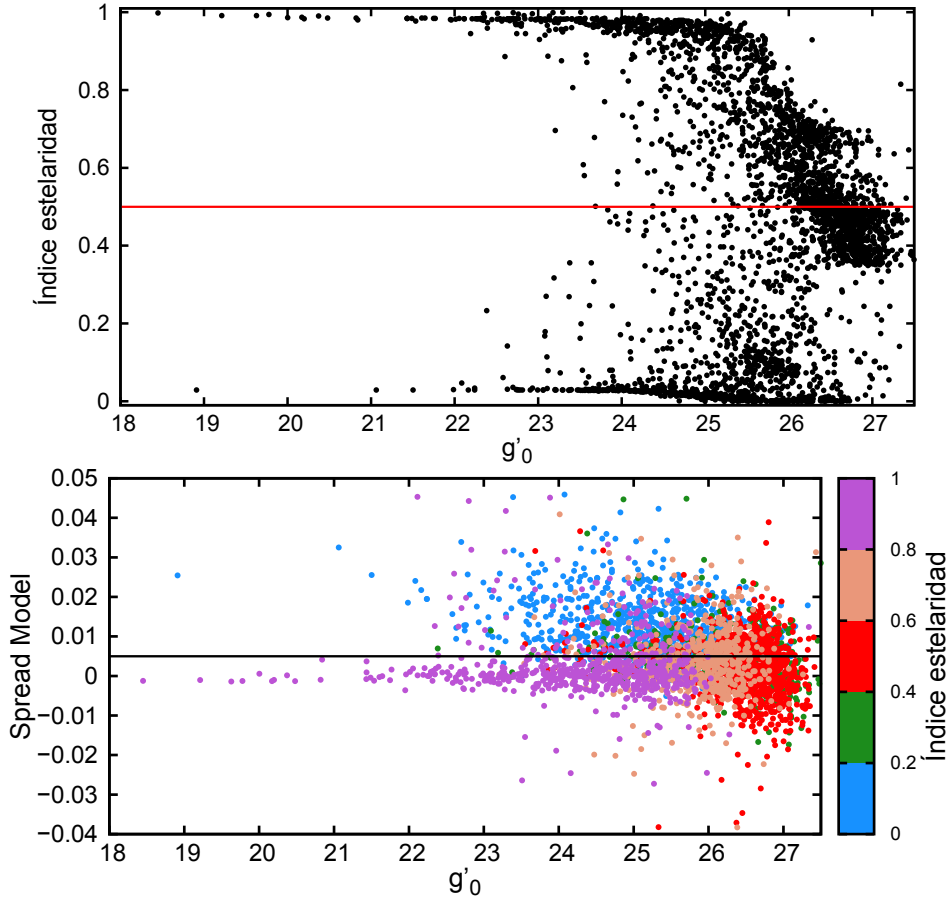


FIGURA A.5: Diagramas de clasificación de objetos, empleando el parámetro *class_star* y *spread_model*, respectivamente.

programa considera resueltos, y 1 a aquellos no resueltos (dicha clasificación es realizada internamente, utilizando una red neuronal). Por su parte, *spread_model* realiza una comparación entre el modelo PSF local y el mismo modelo convolucionado con un disco exponencial de escala $\text{FWHM}/16$. En el panel inferior de la Figura A.5 se observa la secuencia de objetos no resueltos alrededor del valor 0, mientras que los objetos extendidos presentan valores positivos que se apartan de cero a medida que el objeto es más extendido. En la misma figura se muestra, en escala de colores, los valores de *class_star* asignados por SExtractor a cada objeto, y mediante la línea negra horizontal el valor adoptado para clasificar objetos puntuales ($\text{spread_model} < 0.005$, Desai et al. 2012). Es posible apreciar en las figuras que la clasificación de objetos mediante ambos índices, y utilizando los valores de corte mencionados anteriormente, proporcionan una separación confiable entre extendidos/puntuales. Resulta claro, además, que ambos se vuelven inciertos en el extremo débil (magnitudes $g'_0 > 25.5$).

Es conocido entre los usuarios de SExtractor que la correcta clasificación de objetos relativamente brillantes, compactos, aunque marginalmente resueltos, resulta difícil utilizando el parámetro *class_star*. Si bien en el caso de NGC 3414 esto parece no ocurrir, sí se observa en la clasificación realizada sobre la UCD perteneciente al sistema de la galaxia

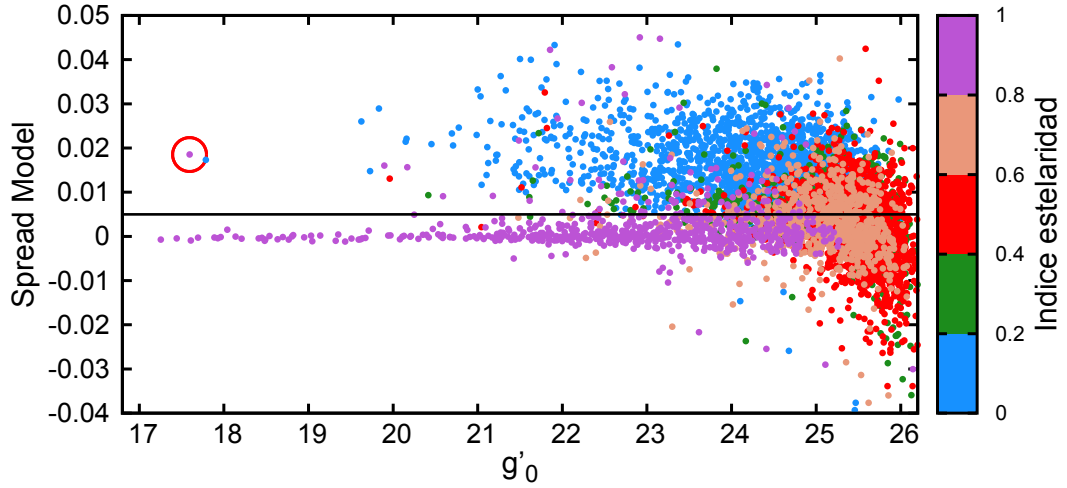


FIGURA A.6: Clasificación realizada por SExtractor+PSFEx sobre los objetos detectados en las imágenes de NGC 4546. El círculo rojo muestra la ubicación de la UCD en dicho diagrama, el cual es clasificado por *class_star* como un objeto puntual, mientras que *spread_model* lo considera extendido.

NGC 4546 (círculo rojo en Figura A.6), estudiada en esta Tesis. Dicho objeto se encuentra claramente resuelto en las imágenes GMOS ya que muestra un valor de FWHM superior al de los objetos puntuales en dichas imágenes. Sin embargo, los valores asignados a los parámetros de clasificación resultan en *class_star*=0.97 y *spread_model*=0.017. Esto indica con claridad que SExtractor considera como puntual al UCD según el parámetro *class_star*, mientras que el objeto en cuestión es clasificado con toda seguridad como extendido por el nuevo índice *spread_model*.

A.1.5 Conclusiones

- La fotometría PSF obtenida a partir de la combinación de los software SExtractor y PSFEx, resulta aceptable al compararla con las mediciones fotométricas de DAOPHOT y ALLSTAR, aunque esta última continúa siendo más confiable.
- La implementación del nuevo parámetro de clasificación *spread_model*, como complemento del conocido índice *class_star* de SExtractor, permite una separación más confiable entre los objetos puntuales y extendidos presentes en las imágenes.
- Un aspecto que se debe mencionar es el tiempo de procesamiento y el armado del modelo PSF. Si bien DAOPHOT es más eficiente en términos de procesamiento de cálculo comparado con SExtractor+PSFEx, el mismo requiere mucho más tiempo por parte del usuario en inspeccionar visualmente el modelado de la PSF. Desde este punto de vista, resulta más rápida y menos engorrosa la realización de fotometría PSF utilizando PSFEx.

Bibliografía

- Andreon, S. 1998, ApJ, 501, 533
- Annunziatella, M., Mercurio, A., Brescia, M., Cavuoti, S., & Longo, G. 2013, PASP, 125, 68
- Aragón-Salamanca, A., Bedregal, A. G., & Merrifield, M. R. 2006, A&A, 458, 101
- Armandroff, T. E. & Zinn, R. 1988, AJ, 96, 92
- Arnold, J. A., Romanowsky, A. J., Brodie, J. P., et al. 2011, ApJ, 736, L26
- Ashman, K. M., Conti, A., & Zepf, S. E. 1995, AJ, 110, 1164
- Ashman, K. M. & Zepf, S. E. 1992, ApJ, 384, 50
- Baggett, W. E., Baggett, S. M., & Anderson, K. S. J. 1998, AJ, 116, 1626
- Bailin, J. & Harris, W. E. 2009, ApJ, 695, 1082
- Balogh, M. L., Navarro, J. F., & Morris, S. L. 2000, ApJ, 540, 113
- Barnes, J. E. & Hernquist, L. 1992, ARA&A, 30, 705
- Barr, J. M., Bedregal, A. G., Aragón-Salamanca, A., Merrifield, M. R., & Bamford, S. P. 2007, A&A, 470, 173
- Bassino, L. P., Faifer, F. R., Forte, J. C., et al. 2006, A&A, 451, 789
- Bassino, L. P., Richtler, T., & Dirsch, B. 2008, MNRAS, 386, 1145
- Beasley, M. A., Baugh, C. M., Forbes, D. A., Sharples, R. M., & Frenk, C. S. 2002, MNRAS, 333, 383
- Bekki, K. 1997, ApJl, 490, L37
- Bekki, K. 1998, ApJl, 502, L133
- Bekki, K. 2014, MNRAS, 438, 444
- Bertin, E. 2011, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 442, Astronomical Data Analysis Software and Systems XX, ed. I.Ñ. Evans, A. Accomazzi, D. J. Mink, & A. H. Rots, 435
- Bertin, E. 2013, PSFEx: Point Spread Function Extractor, Astrophysics Source Code Library
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393
- Bertola, F., Buson, L. M., & Zeilinger, W. W. 1992, ApJl, 401, L79
- Bessell, M. S. 1999, PASP, 111, 1426
- Bettoni, D., Galletta, G., & Oosterloo, T. 1991, MNRAS, 248, 544
- Biermann, P. & Tinsley, B. M. 1975, A&A, 41, 441

- Blom, C., Forbes, D. A., Foster, C., Romanowsky, A. J., & Brodie, J. P. 2014, *MNRAS*, 439, 2420
- Blom, C., Spitler, L. R., & Forbes, D. A. 2012, *MNRAS*, 420, 37
- Bonfini, P., Zezas, A., Birkinshaw, M., et al. 2012, *MNRAS*, 421, 2872
- Book, L. G. & Benson, A. J. 2010, *ApJ*, 716, 810
- Boselli, A. & Gavazzi, G. 2006, *PASP*, 118, 517
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., et al. 2012, *MNRAS*, 427, 127
- Bridges, T., Gebhardt, K., Sharples, R., et al. 2006, *MNRAS*, 373, 157
- Brodie, J. P., Romanowsky, A. J., Strader, J., & Forbes, D. A. 2011, *AJ*, 142, 199
- Brodie, J. P. & Strader, J. 2006, *ARA&A*, 44, 193
- Burstein, D. 1979, *ApJ*, 234, 435
- Burstein, D., Faber, S. M., Gaskell, C. M., & Krumm, N. 1984, *ApJ*, 287, 586
- Cantiello, M., Capaccioli, M., Napolitano, N., et al. 2015, *A&A*, 576, A14
- Cappellari, M. & Emsellem, E. 2004, *PASP*, 116, 138
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., et al. 2011, *MNRAS*, 416, 1680
- Caso, J. P., Bassino, L. P., & Gómez, M. 2015, *MNRAS*, 453, 4421
- Cen, R. 2001, *ApJ*, 560, 592
- Chaboyer, B., Demarque, P., Kernan, P. J., & Krauss, L. M. 1998, *ApJ*, 494, 96
- Chies-Santos, A. L., Cortesi, A., Fantin, D. S. M., et al. 2013, *A&A*, 559, A67
- Chies-Santos, A. L., Larsen, S. S., Cantiello, M., et al. 2012, *A&A*, 539, A54
- Chitre, A. & Jog, C. J. 2002, *A&A*, 388, 407
- Christlein, D. & Zabludoff, A. I. 2004, *ApJ*, 616, 192
- Chung, A., van Gorkom, J. H., Kenney, J. D. P., & Vollmer, B. 2007, *ApJl*, 659, L115
- Cohen, J. G., Blakeslee, J. P., & Côté, P. 2003, *ApJ*, 592, 866
- Condon, J. J., Cotton, W. D., & Broderick, J. J. 2002, *AJ*, 124, 675
- Cortesi, A., Merrifield, M. R., Arnaboldi, M., et al. 2011, *MNRAS*, 414, 642
- Côté, P., Marzke, R. O., & West, M. J. 1998, *ApJ*, 501, 554
- Cowie, L. L. & Songaila, A. 1977, *Nature*, 266, 501
- Crowl, H. H., Kenney, J. D. P., van Gorkom, J. H., & Vollmer, B. 2005, *AJ*, 130, 65
- D'Abrusco, R., Fabbiano, G., Mineo, S., et al. 2014, *ApJ*, 783, 18
- D'Abrusco, R., Fabbiano, G., Strader, J., et al. 2013, *ApJ*, 773, 87
- D'Antona, F., Bellazzini, M., Caloi, V., et al. 2005, *ApJ*, 631, 868
- Davies, R. D. & Lewis, B. M. 1973, *MNRAS*, 165, 231
- Davis, T. A., Rowlands, K., Allison, J. R., et al. 2015, *MNRAS*, 449, 3503
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., & Corwin, H. G. 1976, 2nd reference catalogue of bright galaxies containing information on 4364 galaxies with reference to papers published between 1964 and 1975

- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Jr., H. G., et al. 1991, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h . Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h .
- Denicoló, G., Terlevich, R., Terlevich, E., et al. 2005, MNRAS, 356, 1440
- Desai, S., Armstrong, R., Mohr, J. J., et al. 2012, ApJ, 757, 83
- Desai, V., Dalcanton, J. J., Aragón-Salamanca, A., et al. 2007, ApJ, 660, 1151
- Di Criscienzo, M., Caputo, F., Marconi, M., & Musella, I. 2006, MNRAS, 365, 1357
- Dotter, A., Sarajedini, A., Anderson, J., et al. 2010, ApJ, 708, 698
- Dressler, A. 1980, ApJ, 236, 351
- Dressler, A., Oemler, Jr., A., Couch, W. J., et al. 1997, ApJ, 490, 577
- Drinkwater, M. J., Jones, J. B., Gregg, M. D., & Phillipps, S. 2000, PASA, 17, 227
- Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., Chromey, F. R., Hasselbacher, D. A., & Bissell, B. A. 1996, AJ, 111, 1880
- Elson, R. A. W. & Santiago, B. X. 1996, MNRAS, 280, 971
- Erwin, P. & Sparke, L. S. 2003, ApJS, 146, 299
- Escudero, C. G. 2011, Master's thesis, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata, UNLP.
- Escudero, C. G., Faifer, F. R., Bassino, L. P., Calderón, J. P., & Caso, J. P. 2015a, MNRAS, 449, 612
- Escudero, C. G., Sesto, L. A., González, N. M., et al. 2015b, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina, 57, 19
- Fabello, S., Catinella, B., Giovanelli, R., et al. 2011, MNRAS, 411, 993
- Faifer, F. R., Forte, J. C., Norris, M. A., et al. 2011, MNRAS, 416, 155
- Fasano, G., Poggianti, B. M., Couch, W. J., et al. 2000, ApJ, 542, 673
- Feldmann, R., Mayer, L., & Carollo, C. M. 2008, ApJ, 684, 1062
- Ferré-Mateu, A., Vazdekis, A., Trujillo, I., et al. 2012, MNRAS, 423, 632
- Fleming, D. E. B., Harris, W. E., Pritchet, C. J., & Hanes, D. A. 1995, AJ, 109, 1044
- Fogarty, L. M. R., Bland-Hawthorn, J., Croom, S. M., et al. 2012, ApJ, 761, 169
- Forbes, D. A., Almeida, A., Spitler, L. R., & Pota, V. 2014, MNRAS, 442, 1049
- Forbes, D. A. & Bridges, T. 2010, MNRAS, 404, 1203
- Forbes, D. A., Brodie, J. P., & Grillmair, C. J. 1997, AJ, 113, 1652
- Forbes, D. A. & Forte, J. C. 2001, MNRAS, 322, 257
- Forbes, D. A., Ponman, T., & O'Sullivan, E. 2012, MNRAS, 425, 66
- Forbes, D. A., Spitler, L. R., Strader, J., et al. 2011, MNRAS, 413, 2943
- Forte, J. C., Faifer, F., & Geisler, D. 2005, MNRAS, 357, 56
- Forte, J. C., Faifer, F., & Geisler, D. 2007, MNRAS, 382, 1947
- Forte, J. C., Faifer, F. R., Vega, E. I., et al. 2013, MNRAS, 431, 1405
- Forte, J. C., Geisler, D., Ostrov, P. G., Piatti, A. E., & Gieren, W. 2001, AJ, 121, 1992

- Forte, J. C., Vega, E. I., & Faifer, F. 2009, MNRAS, 397, 1003
- Forte, J. C., Vega, E. I., & Faifer, F. 2012, MNRAS, 421, 635
- Forte, J. C., Vega, E. I., Faifer, F. R., et al. 2014, MNRAS, 441, 1391
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., et al. 1996, AJ, 111, 1748
- Fukugita, M., Shimasaku, K., & Ichikawa, T. 1995, PASP, 107, 945
- Galletta, G. 1987, ApJ, 318, 531
- Garcia, A. M. 1993, A&A, 100, 47
- Geisler, D., Lee, M. G., & Kim, E. 1996, AJ, 111, 1529
- Georgiev, I. Y., Puzia, T. H., Goudfrooij, P., & Hilker, M. 2010, MNRAS, 406, 1967
- Giovanelli, R. & Haynes, M. P. 1985, ApJ, 292, 404
- Girardi, L., Groenewegen, M. A. T., Hatziminaoglou, E., & da Costa, L. 2005, A&A, 436, 895
- Gonçalves, T. S., Martin, D. C., Menéndez-Delmestre, K., Wyder, T. K., & Koekemoer, A. 2012, ApJ, 759, 67
- González, J. J. 1993, PhD thesis, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA CRUZ, 1993. Source: Dissertation Abstracts International, Volume: 54-05, Section: B, page: 2551.
- Gordon, S., Koribalski, B., & Jones, K. 2003, MNRAS, 342, 939
- Goudfrooij, P., Gilmore, D., Whitmore, B. C., & Schweizer, F. 2004, ApJl, 613, L121
- Goudfrooij, P., Schweizer, F., Gilmore, D., & Whitmore, B. C. 2007, AJ, 133, 2737
- Graham, A. W. 2013, Elliptical and Disk Galaxy Structure and Modern Scaling Laws (Oswalt, T. D. and Keel, W. C.), 91
- Gratton, R. G., Carretta, E., & Bragaglia, A. 2012, A&A Rev., 20, 50
- Gunn, J. E. & Gott, III, J. R. 1972, ApJ, 176, 1
- Hargis, J. R. & Rhode, K. L. 2012, AJ, 144, 164
- Hargis, J. R. & Rhode, K. L. 2014, ApJ, 796, 62
- Hargis, J. R., Rhode, K. L., Strader, J., & Brodie, J. P. 2011, ApJ, 738, 113
- Harris, W. E. 1991, ARA&A, 29, 543
- Harris, W. E. 2001, in Saas-Fee Advanced Course 28: Star Clusters, ed. L. Labhardt & B. Binggeli, 223
- Harris, W. E. 2009a, ApJ, 699, 254
- Harris, W. E. 2009b, ApJ, 703, 939
- Harris, W. E., Harris, G. L. H., & Alessi, M. 2013, ApJ, 772, 82
- Harris, W. E. & van den Bergh, S. 1981, AJ, 86, 1627
- Harris, W. E., Whitmore, B. C., Karakla, D., et al. 2006, ApJ, 636, 90
- Hartmann, M., Debattista, V. P., Cole, D. R., et al. 2014, MNRAS, 441, 1243
- Haynes, M. P., Giovanelli, R., & Chincarini, G. L. 1984, ARA&A, 22, 445
- Hirschmann, M., De Lucia, G., Wilman, D., et al. 2014, MNRAS, 444, 2938

- Ho, I.-T., Kewley, L. J., Dopita, M. A., et al. 2014, *MNRAS*, 444, 3894
- Holden, B. P., Franx, M., Illingworth, G. D., et al. 2009, *ApJ*, 693, 617
- Hook, I. M., Jørgensen, I., Allington-Smith, J. R., et al. 2004, *PASP*, 116, 425
- Hu, J. 2009, ArXiv e-prints [[arXiv]0908.2028]
- Hubble, E. P. 1936, *Realm of the Nebulae*
- Hudson, M. J., Harris, G. L., & Harris, W. E. 2014, *ApJl*, 787, L5
- Jacoby, G. H., Branch, D., Ciardullo, R., et al. 1992, *PASP*, 104, 599
- Janz, J., Forbes, D. A., Norris, M. A., et al. 2015, *MNRAS*, 449, 1716
- Jedrzejewski, R. I. 1987, *MNRAS*, 226, 747
- Jordán, A., McLaughlin, D. E., Côté, P., et al. 2007, *ApJ*, 171, 101
- Jørgensen, I. 2009, *PASA*, 26, 17
- Katkov, I. Y., Sil'chenko, O. K., & Afanasiev, V. L. 2014, *Astrophysical Bulletin*, 69, 121
- Kissler-Patig, M. 2000, in *Reviews in Modern Astronomy*, Vol. 13, *Reviews in Modern Astronomy*, ed. R. E. Schielicke, 13–44
- Kissler-Patig, M., Forbes, D. A., & Minniti, D. 1998, *MNRAS*, 298, 1123
- Kissler-Patig, M., Kohle, S., Hilker, M., et al. 1997, *A&A*, 319, 470
- Koopmann, R. A. & Kenney, J. D. P. 2004, *ApJ*, 613, 866
- Kormendy, J. & Bender, R. 1996, *ApJ*, 464, L119
- Kormendy, J. & Bender, R. 2012, *ApJs*, 198, 2
- Kormendy, J. & Kennicutt, Jr., R. C. 2004, *ARA&A*, 42, 603
- Kostiuk, I. P. & Sil'chenko, O. K. 2015, *Astrophysical Bulletin*, 70, 280
- Krajinović, D., Cappellari, M., Emsellem, E., McDermid, R. M., & de Zeeuw, P. T. 2005, *MNRAS*, 357, 1113
- Kron, R. G. 1980, *ApJS*, 43, 305
- Kruijssen, J. M. D. 2015, *MNRAS*, 454, 1658
- Kundu, A. & Whitmore, B. C. 2001, *AJ*, 121, 2950
- Kuntschner, H., Emsellem, E., Bacon, R., et al. 2010, *MNRAS*, 408, 97
- Kuntschner, H., Ziegler, B. L., Sharples, R. M., Worthey, G., & Fricke, K. J. 2002, *A&A*, 395, 761
- Landolt, A. U. 1992, *AJ*, 104, 340
- Larsen, S. S. & Brodie, J. P. 2000, *AJ*, 120, 2938
- Larsen, S. S., Brodie, J. P., Huchra, J. P., Forbes, D. A., & Grillmair, C. J. 2001, *AJ*, 121, 2974
- Larson, R. B., Tinsley, B. M., & Caldwell, C.Ñ. 1980, *ApJ*, 237, 692
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., et al. 2006, *AJ*, 132, 2634
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., Knapen, J. H., & Comerón, S. 2010, *MNRAS*, 405, 1089

- Li, Z.-Y., Ho, L. C., Barth, A. J., & Peng, C. Y. 2011, *ApJs*, 197, 22
- Loubser, S. I., Sánchez-Blázquez, P., Sansom, A. E., & Soechting, I. K. 2009, *MNRAS*, 398, 133
- Lupton, R. 2005, <http://www.sdss.org/dr12/algorithms/sdssubvritransform/>
- Machacek, M. E., O'Sullivan, E., Randall, S. W., Jones, C., & Forman, W. R. 2010, *ApJ*, 711, 1316
- Mahdavi, A., Trentham, N., & Tully, R. B. 2005, *AJ*, 130, 1502
- Mapelli, M., Rampazzo, R., & Marino, A. 2015, *A&A*, 575, A16
- Maraston, C., Kissler-Patig, M., Brodie, J. P., Barmby, P., & Huchra, J. P. 2001, *A&A*, 370, 176
- Maraston, C. & Strömbäck, G. 2011, *MNRAS*, 418, 2785
- Marín-Franch, A. & Aparicio, A. 2002, *ApJ*, 568, 174
- Massey, P., Valdes, F., & Barnes, J. 1992, *A User's Guide to Reducing Slit Spectra with IRAF*
- Mathieu, A., Merrifield, M. R., & Kuijken, K. 2002, *MNRAS*, 330, 251
- Mazzei, P., Marino, A., & Rampazzo, R. 2014a, *ApJ*, 782, 53
- Mazzei, P., Marino, A., Rampazzo, R., Galletta, G., & Bettoni, D. 2014b, *Advances in Space Research*, 53, 950
- McDermid, R. M., Alatalo, K., Blitz, L., et al. 2015, *MNRAS*, 448, 3484
- McLaughlin, D. E. 1999, *AJ*, 117, 2398
- McLaughlin, D. E., Harris, W. E., & Hanes, D. A. 1994, *ApJ*, 422, 486
- Mendel, J. T., Simard, L., Ellison, S. L., & Patton, D. R. 2013, *MNRAS*, 429, 2212
- Meurer, G. R., Heckman, T. M., Leitherer, C., et al. 1995, *AJ*, 110, 2665
- Michard, R. & Marchal, J. 1993, *A&As*, 98, 29
- Michard, R. & Marchal, J. 1994, *A&As*, 105
- Michard, R. & Poulain, P. 2000, *A&AS*, 141, 1
- Mieske, S., Hilker, M., Infante, L., & Jordán, A. 2006a, *AJ*, 131, 2442
- Mieske, S., Infante, L., Benítez, N., et al. 2004, *AJ*, 128, 1529
- Mieske, S., Jordán, A., Côté, P., et al. 2006b, *ApJ*, 653, 193
- Mieske, S., Jordán, A., Côté, P., et al. 2010, *ApJ*, 710, 1672
- Mohr, J. J., Armstrong, R., Bertin, E., et al. 2012, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 8451, *Software and Cyberinfrastructure for Astronomy II*, 84510D
- Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A., & Oemler, A. 1996, *Nature*, 379, 613
- Mould, J., Reynolds, T., Readhead, T., et al. 2012, *ApJS*, 203, 14
- Munn, J. A. 1992, *ApJ*, 399, 444
- Muratov, A. L. & Gnedin, O. Y. 2010, *ApJ*, 718, 1266
- Nagar, N. M., Falcke, H., & Wilson, A. S. 2005, *A&A*, 435, 521

- Norris, M. A., Escudero, C. G., Faifer, F. R., et al. 2015, *MNRAS*, 451, 3615
- Norris, M. A., Gebhardt, K., Sharples, R. M., et al. 2012, *MNRAS*, 421, 1485
- Norris, M. A. & Kannappan, S. J. 2011, *MNRAS*, 414, 739
- Norris, M. A., Sharples, R. M., Bridges, T., et al. 2008, *MNRAS*, 385, 40
- Norris, M. A., Sharples, R. M., & Kuntschner, H. 2006, *MNRAS*, 367, 815
- Nulsen, P. E. J. 1982, *MNRAS*, 198, 1007
- Ostrov, P. G., Forte, J. C., & Geisler, D. 1998, *AJ*, 116, 2854
- O’Sullivan, E., Forbes, D. A., & Ponman, T. J. 2001, *MNRAS*, 328, 461
- O’Sullivan, E., Ponman, T. J., & Collins, R. S. 2003, *MNRAS*, 340, 1375
- Peletier, R. F. & Balcells, M. 1997, *New Astronomy*, 1, 349
- Peletier, R. F., Balcells, M., Davies, R. L., et al. 1999, *MNRAS*, 310, 703
- Peletier, R. F., Davies, R. L., Illingworth, G. D., Davis, L. E., & Cawson, M. 1990, *AJ*, 100, 1091
- Peng, E. W., Jordán, A., Côté, P., et al. 2006, *ApJ*, 639, 95
- Perrett, K. M., Hanes, D. A., Butterworth, S. T., et al. 1997, *AJ*, 113, 895
- Pfenniger, D. & Norman, C. 1990, *ApJ*, 363, 391
- Pierce, M., Beasley, M. A., Forbes, D. A., et al. 2006a, *MNRAS*, 366, 1253
- Pierce, M., Bridges, T., Forbes, D. A., et al. 2006b, *MNRAS*, 368, 325
- Pipino, A., Puzia, T. H., & Matteucci, F. 2007, *ApJ*, 665, 295
- Postman, M., Franx, M., Cross, N. J. G., et al. 2005, *ApJ*, 623, 721
- Pota, V., Forbes, D. A., Romanowsky, A. J., et al. 2013, *MNRAS*, 428, 389
- Prochaska Chamberlain, L. C., Courteau, S., McDonald, M., & Rose, J. A. 2011, *MNRAS*, 412, 423
- Proctor, R.Ñ., Forbes, D. A., & Beasley, M. A. 2004, *MNRAS*, 355, 1327
- Proctor, R.Ñ. & Sansom, A. E. 2002, *MNRAS*, 333, 517
- Puzia, T. H., Kissler-Patig, M., Brodie, J. P., & Huchra, J. P. 1999, *AJ*, 118, 2734
- Puzia, T. H., Kissler-Patig, M., Thomas, D., et al. 2005, *A&A*, 439, 997
- Puzia, T. H., Kissler-Patig, M., Thomas, D., et al. 2004, *A&A*, 415, 123
- Rasmussen, J., Ponman, T. J., Verdes-Montenegro, L., Yun, M. S., & Borthakur, S. 2008, *MNRAS*, 388, 1245
- Ravindranath, S., Ho, L. C., Peng, C. Y., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 2001, *AJ*, 122, 653
- Rejkuba, M. 2012, *Ap&SS*, 341, 195
- Richtler, T. 2003, in *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, Vol. 635, *Stellar Candles for the Extragalactic Distance Scale*, ed. D. Alloin & W. Gieren, 281–305
- Rusli, S. P., Thomas, J., Saglia, R. P., et al. 2013, *AJ*, 146, 45
- Sandage, A. & Tammann, G. A. 1995, *ApJ*, 446, 1

- Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, *ApJ*, 737, 103
- Schweizer, F., Whitmore, B. C., & Rubin, V. C. 1983, *AJ*, 88, 909
- Secker, J. 1992, *AJ*, 104, 1472
- Seifert, W. & Scorza, C. 1996, *A&A*, 310, 75
- Sil'chenko, O. K. 2006, *ApJ*, 641, 229
- Sil'chenko, O. K., Chilingarian, I. V., Sotnikova, N. Y., & Afanasiev, V. L. 2011, *MNRAS*, 414, 3645
- Sil'chenko, O. K., Proshina, I. S., Shulga, A. P., & Kuposov, S. E. 2012, *MNRAS*, 427, 790
- Sivanandam, S., Rieke, M. J., & Rieke, G. H. 2010, *ApJ*, 717, 147
- Smith, G. P., Treu, T., Ellis, R. S., Moran, S. M., & Dressler, A. 2005, *ApJ*, 620, 78
- Smith, J. A., Allam, S. S., Tucker, D. L., et al. 2007, submitted
- Smith, J. A., Tucker, D. L., Kent, S., et al. 2002, *AJ*, 123, 2121
- Smith, R. J., Lucey, J. R., Hammer, D., et al. 2010, *MNRAS*, 408, 1417
- Solanes, J. M., Manrique, A., García-Gómez, C., et al. 2001, *ApJ*, 548, 97
- Spitler, L. R., Larsen, S. S., Strader, J., et al. 2006, *AJ*, 132, 1593
- Stetson, P. B. 1987, *PASP*, 99, 191
- Strader, J., Beasley, M. A., & Brodie, J. P. 2007, *AJ*, 133, 2015
- Strader, J., Brodie, J. P., & Forbes, D. A. 2004, *AJ*, 127, 3431
- Strader, J., Brodie, J. P., Spitler, L., & Beasley, M. A. 2006, *AJ*, 132, 2333
- Strader, J., Romanowsky, A. J., Brodie, J. P., et al. 2011, *ApJS*, 197, 33
- Strader, J., Seth, A. C., Forbes, D. A., et al. 2013, *ApJ*, 775, L6
- Strader, J. & Smith, G. H. 2008, *AJ*, 136, 1828
- Sun, M., Donahue, M., & Voit, G. M. 2007, *ApJ*, 671, 190
- Tal, T., van Dokkum, P. G., Nelan, J., & Bezanson, R. 2009, *AJ*, 138, 1417
- Theureau, G., Hanski, M. O., Coudreau, N., Hallet, N., & Martin, J.-M. 2007, *A&A*, 465, 71
- Thomas, D., Maraston, C., & Bender, R. 2003, *MNRAS*, 339, 897
- Thomas, D., Maraston, C., & Korn, A. 2004, *MNRAS*, 351, L19
- Tonry, J. & Davis, M. 1979, *AJ*, 84, 1511
- Tonry, J. L., Dressler, A., Blakeslee, J. P., et al. 2001, *ApJ*, 546, 681
- Trager, S. C., Worthey, G., Faber, S. M., Burstein, D., & González, J. J. 1998, *ApJS*, 116, 1
- Treu, T., Ellis, R. S., Kneib, J.-P., et al. 2003, *ApJ*, 591, 53
- Tully, R. B., Courtois, H. M., Dolphin, A. E., et al. 2013, *AJ*, 146, 86
- Usher, C., Forbes, D. A., Brodie, J. P., et al. 2012, *MNRAS*, 426, 1475
- Usher, C., Forbes, D. A., Spitler, L. R., et al. 2013, *MNRAS*, 436, 1172

- van den Bergh, S. 1976, *ApJ*, 206, 883
- Vazdekis, A., Coelho, P., Cassisi, S., et al. 2015, *MNRAS*, 449, 1177
- Vazdekis, A., Ricciardelli, E., Cenarro, A. J., et al. 2012, *MNRAS*, 424, 157
- Veilleux, S., Cecil, G., & Bland-Hawthorn, J. 2005, *ARA&A*, 43, 769
- Villegas, D., Jordán, A., Peng, E. W., et al. 2010, *ApJ*, 717, 603
- Vollmer, B., Soida, M., Chung, A., et al. 2009, *A&A*, 496, 669
- Wang, Q., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., et al. 2013, *ApJ*, 769, 145
- Wegner, G., Bernardi, M., Willmer, C.Ñ. A., et al. 2003, *AJ*, 126, 2268
- Wehner, E. M. H., Harris, W. E., Whitmore, B. C., Rothberg, B., & Woodley, K. A. 2008, *ApJ*, 681, 1233
- Whitmore, B. C. 1997, in *The Extragalactic Distance Scale*, ed. M. Livio, M. Donahue, & N. Panagia, 254–272
- Whitmore, B. C., Lucas, R. A., McElroy, D. B., et al. 1990, *AJ*, 100, 1489
- Whitmore, B. C., Zhang, Q., Leitherer, C., et al. 1999, *AJ*, 118, 1551
- Woodley, K. A., Harris, W. E., Puzia, T. H., et al. 2010, *ApJ*, 708, 1335
- Worthey, G. 1994, *ApJS*, 95, 107
- Worthey, G., Faber, S. M., Gonzalez, J. J., & Burstein, D. 1994, *ApJS*, 94, 687
- Worthey, G. & Ottaviani, D. L. 1997, *ApJS*, 111, 377
- Wu, P.-F., Gal, R. R., Lemaux, B. C., et al. 2014, *ApJ*, 792, 16
- Yagi, M., Komiyama, Y., Yoshida, M., et al. 2007, *ApJ*, 660, 1209
- Yoon, S.-J., Yi, S. K., & Lee, Y.-W. 2006, *Science*, 311, 1129
- Yoshida, M., Yagi, M., Komiyama, Y., et al. 2008, *ApJ*, 688, 918
- Zasov, A. V., Sil’chenko, O. K., Katkov, I. Y., & Dodonov, S.Ñ. 2013, *Astronomy Letters*, 39, 17
- Zepf, S. E. & Ashman, K. M. 1993, *MNRAS*, 264, 611